

SUBMILLIMETER SPECTROSCOPY OF SEMICONDUCTORS

E. M. GERSHENZON

Applications of submillimeter technique for semiconductor spectroscopy are discussed. The technique is based on backward wave oscillators (BWO) – voltage tunable monochromatic electromagnetic waves generators.

Обсуждаются возможности субмиллиметровой спектроскопии полупроводников, основанной на применении перестраиваемых генераторов монохроматического электромагнитного излучения – ламп обратной волны (ЛОВ).

СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Е. М. ГЕРШЕНЗОН

Московский государственный педагогический университет

ВВЕДЕНИЕ

В статье [1] было рассказано об успехах спектроскопии в очень важном для исследований вещества во всех агрегатных состояниях и слабо освоенном участке электромагнитного спектра – на субмиллиметровых волнах, которые стали возможными благодаря созданию монохроматических и перестраиваемых питающим напряжением генераторов этого диапазона – ламп обратной волны (ЛОВ). В этой статье, посвященной исследованию полупроводников, возможности новой области спектроскопии проявляются наиболее разносторонне и наглядно.

В традиционном представлении спектроскопия и радиоспектроскопия имеют разные области исследований и существенно разнесены по частотам наблюдения. В полупроводниках из-за значительной диэлектрической проницаемости ($\chi \geq 10$) и малой эффективной массы носителей заряда ($m^* \leq 0,1m_0$, где m_0 – масса свободного электрона) эти области изучения свойств вещества на субмиллиметровых волнах просто перекрываются и спектроскопические методы, основанные на вариации частоты наблюдения, и модуляционные магнитные методики сосуществуют и взаимно дополняют друг друга. Скажем, характерные для спектроскопии исследования возбужденных состояний атомов, эффекта Зеемана и др. приводят к тем же эффектам поглощения α и изменения проводимости σ , что и обычные для радиоспектроскопии циклотронный и спиновый резонансы.

По-новому в этих условиях встают и такие вопросы физики полупроводников, как разогрев носителей в электрическом поле E , воздействие света, возможности изучения высокоэнергичных фононов и др.

1. Ряд объектов в полупроводниках имеет достаточно малые энергии связи ($\mathcal{E} = 1\text{--}5$ мэВ), поэтому характеристические для них частоты соответствуют субмиллиметровому диапазону. Среди них весь спектр возбужденных состояний мелких примесей в полупроводниках, энергии связи многих примесных комплексов, экситонов, энергии активации прыжков электронов между примесями, приводящих к проводимости, зеемановские и штарковские переходы для возбужденных состояний примеси и т.д. На этих же частотах реализуется квантовый циклотронный и

спиновый резонансы, циклотронный резонанс электронов, локализованных на примесях.

2. Кроме самостоятельного значения для полупроводников субмиллиметровые эксперименты с ними перспективны как модельные по реализации экстремальных условий, пока неосуществимых в лабораторных условиях [2]. Пример: воздействие магнитного поля H на примесный атом. Даже в германии Ge и арсениде галлия GaAs во вполне доступных постоянных $H \approx 60$ кЭ эквивалентное по отношению к свободному атому магнитное поле составляет $H_{\text{экв}} \approx 3$ ГЭ, недостижимое к настоящему времени и в импульсном режиме. Такие материалы, как антимонид индия n-InSb, где энергия связи и эффективная масса электронов наименьшие, могут стать особенно перспективны для такого рода опытов. По-новому можно ставить вопросы исследования интерференции возбужденных состояний атома и влияния на него H , E , изучения отрицательных ионов и т.д.

3. Практическая значимость субмиллиметровых исследований полупроводников может быть в на-

стоящее время проиллюстрирована такими применениями, как химический анализ примесей в полупроводниках, определение ряда констант для материалов и создание новых типов фоторезисторов и болометров.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ

На рис. 1 приведены простейшая блок-схема ЛОВ-спектрометра, предназначенного для исследования полупроводников, и типичная конструкция держателя образца. Прибор покрывает область спектра от 2000 до 200 мкм с помощью нескольких ЛОВ. В полупроводниках (в отличие, например, от газов) наиболее узкие спектральные линии даже для изолированных центров из-за наличия фононов и при гелиевых температурах имеют ширину $\Delta\mathcal{E} \geq 10^{-3}$ мэВ, поэтому вопросы специальной стабилизации частоты генераторов не стоят: разрешающая способность спектрометра $\lambda/\Delta\lambda = 10^5$ достигается применением хороших блоков питания. При необходимости используется автоматическая подстройка частоты. Сложнее со стабилизацией

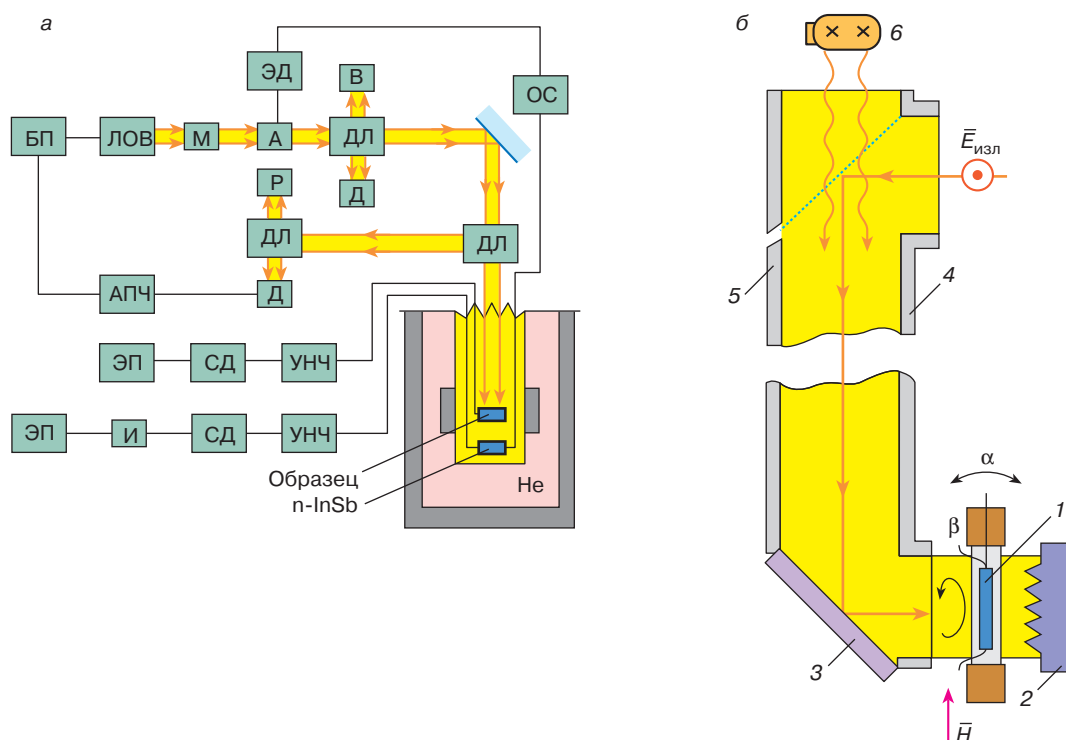


Рис. 1. а – блок-схема субмиллиметрового спектрометра для исследования полупроводников и б – конструкция лучевода и держателя образца, имеющего две степени свободы α , β для ориентации кристаллографических осей образца относительно магнитного поля H .

ЛОВ – лампа обратной волны, БП – блок питания ЛОВ, М – модулятор, А – аттенюатор с электродвигателем ЭД, включенным в цепь обратной связи ОС, ДЛ – делитель луча, В – волномер, Д – детектор, Р – резонатор, АПЧ – цепь автоподстройки частоты, ЭП – электронный потенциометр, СД – синхродетектор, УНЧ – усилитель низкой частоты, И – интегратор. 1 – образец, 2 – согласованная нагрузка, 3 – металлическое зеркало, 4 – диэлектрический лучевод, 5 – проволочная решетка, 6 – лампа накаливания

мощности излучения в диапазоне перестройки частоты каждой ЛОВ: недостатком ЛОВ является изрезанность их амплитудно-частотных характеристик. Выравнивание уровня мощности излучения, падающего на исследуемый образец, можно производить с помощью аттенюатора, включенного в цепь электромеханической отрицательной обратной связи. Измерения в спектрометре проводятся по фотопроводимости исследуемого образца либо по поглощению им излучения с помощью приемника из n -InSb, расположенного за образцом. Держатель образца помещается в гелиевый криостат со сверхпроводящим соленоидом ($H_{\max} \approx 60$ кЭ). Применяется развертка частоты или магнитного поля. Высокочастотный тракт выполняется в квазиоптическом исполнении. Предусмотрены возможности поляризационных измерений (включая круговую поляризацию), подсвета образцов, воздействия на них одноосного сжатия P , электрического поля E , изменения температуры T , юстировки их положения. При измерениях фотопроводимости применяется стандартная модуляционная методика с синхронным детектированием, при измерении малых коэффициентов поглощения (до $\alpha \approx 10^{-5} \text{ см}^{-1}$) — метод двойной модуляции магнитного поля с последующим восстановлением формы спектра из сигнала производной интегратором. При необходимости в условиях одного эксперимента можно регистрировать спектры как фотопроводимости, так и поглощения. Образец можно помещать и в открытый резонатор.

В экспериментах были использованы образцы германия Ge, кремния Si, арсенида галлия GaAs и антимонида индия n -InSb как технологически наиболее освоенных материалов, позволяющих провести исследования различных слабосвязанных состояний в полупроводниках.

Следует отметить, что тогда, когда это возможно, здесь применяется балансная методика, при которой регистрируется в первую очередь изменение параметров исследуемого образца. Например, при индикации циклотронного резонанса (ЦР) свободные носители в полупроводнике при низких температурах генерируются с помощью модулированной подсветки, поэтому применение синхронного детектирования на частоте модуляции исключает помехи приему. В случае необходимости индикация резонанса осуществляется непосредственно по изменению статической проводимости образца σ в магнитном поле при фиксированной частоте излучения с помощью нанесенных на него контактов.

При исследовании примесей балансная методика реализуется за счет использования явления фототермической ионизации возбужденных состояний атомов [3], соответствующей двухступенчатому процессу (возбуждению атома резонансным фотоном и затем его ионизации с участием фононов), в результате которого вновь наблюдается резонанс-

ное изменение статической проводимости образца (см. рис. 4–7 в [2]). Эта фотопроводимость, возникающая под действием излучения, позволяет при низких температурах (а именно они представляют наибольший интерес в такого рода исследованиях) наблюдать эффекты практически при отсутствии постоянной составляющей сигнала. Это определяется тем, что кванты субмиллиметрового излучения в большинстве случаев не возбуждают зонную проводимость и достаточно слабо взаимодействуют со свободными носителями заряда.

Нас будут интересовать прежде всего такие объекты, характеристические частоты которых соответствуют субмиллиметровому диапазону волн, $\nu \approx 10^{11} - 1,5 \cdot 10^{12}$ Гц, то есть квантам излучения $\mathcal{E} = h\nu \sim 5 \cdot 10^{-16} - 10^{-14}$ эрг. Естественно, что присущие им квантовые явления проявляются при достаточно низких температурах ($kT \leq h\nu$, $T \sim 3 - 50$ К). Только в этих условиях даже простейшие образования, которые мы привыкли рассматривать сугубо классическими, в полной мере проявляют свою квантовую природу и становятся экзотическими источниками информации о строении вещества. Ниже мы приведем примеры именно самых простых объектов исследования в твердых телах — свободных электронов и дырок, их пар, связанных кулоновским взаимодействием (экситонов), водородоподобных атомов примесей (H-центров) и молекулярных комплексов на их основе (например, H_2^+).

ПРИМЕРЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Примеси в Ge и GaAs. Изучение водородоподобных примесей в полупроводниках позволяет не только исследовать примесные атомы, но и получить ценную информацию о самом кристалле.

В отличие от общепринятых в инфракрасном диапазоне спектральных исследований, когда изучаются переходы электронов с основного состояния примесного атома в возбужденные, на субмиллиметровых волнах, как правило, исследуются переходы между возбужденными состояниями. Исключением являются лишь эксперименты с n -GaAs в магнитном поле, где в диапазон используемого спектрометра попадают и переходы с основного состояния. В большинстве экспериментов спектры регистрировались по фотопроводимости, связанной фототермической ионизации возбужденных состояний. О спектроскопии примесей уже рассказывалось в статье [2], посвященной исследованию одиночных атомов: при очень малых концентрациях и низких температурах, исключающих внешние воздействия, примесные атомы ведут себя как изолированные. Там были приведены спектры фотопроводимости сурьмы Sb в Ge и диаграмма измеренных переходов между возбужденными состояниями для этой примеси, а также результаты измерений GaAs и n -InSb в магнитном поле, из которых, в частности, следует, что это прекрасные модельные

материалы для исследования атомов в сверхсильных полях.

Для стартовых возбужденных состояний труднее становится идентификация переходов, чем для серии Лаймана, но в связи с богатством спектра растут и возможности измерений. Их основные результаты сводятся к следующему. Определен энергетический спектр большого числа возбужденных состояний для доноров и акцепторов различной природы в Ge, изучены их зеемановское расщепление в широком интервале H от сотен эрстед до 60 кЭ и анизотропия эффекта Зеемана, воздействие давления, влияние температуры, подсвета и электрического поля на заселение состояний, исследованы интенсивность и ширина линий переходов и влияние на нее концентрации примесей и условий эксперимента, взаимодействие состояний. Обнаружены особенности спектров фотопроводимости и поглощения, обязанных переходам между возбужденными состояниями, установлено для них влияние химической природы примесей, в некоторых случаях существенно уточнены литературные данные и определены области применимости имеющихся расчетов. Малая инерционность ЛОВ при таких спектральных исследованиях может быть использована для исследования кинетики, например для измерения коротких времен жизни электронов в возбужденных состояниях. Для этого наряду с другими параметрами измеряется зависимость сигнала фотопроводимости ΔU для какой-либо из исследуемых линий от частоты амплитудной модуляции Ω . Для определения времени релаксации зеемановских переходов в любой фиксированной точке спектра осуществляется высокочастотная амплитудная модуляция, частоту которой можно изменять в диапазоне $2 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^8$ Гц. Для этого на постоянное анодное напряжение U_a накладывается небольшая переменная составляющая от внешнего генератора с частотой $2 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^7$ Гц, которая приводит к амплитудной модуляции из-за зависимости мощности излучения P от U_a . Для увеличения глубины модуляции до 100% и устранения синхронной наводки на частоте регистрации в квазиоптический тракт включается интерферометр Майкельсона, что дает возможность использовать сразу K интерференционных максимумов зависимости $P(U_a)$ и повысить частоту модуляции в $2K$ раз. При исследовании еще более коротких времен релаксации до $10^{-10} - 10^{-11}$ секунд можно использовать биения частоты двух идентичных ЛОВ, одна из которых фиксирована по частоте, а у другой частота перестраивается в нужных пределах. Такой способ применяется для получения разностной частоты вплоть до гигагерц.

В дополнение к спектрам примесей, представленным в [2], приведем только одну иллюстрацию. Рис. 2 показывает возможность применения субмиллиметровой спектроскопии для химического анализа примесей в полупроводниках, в том числе в

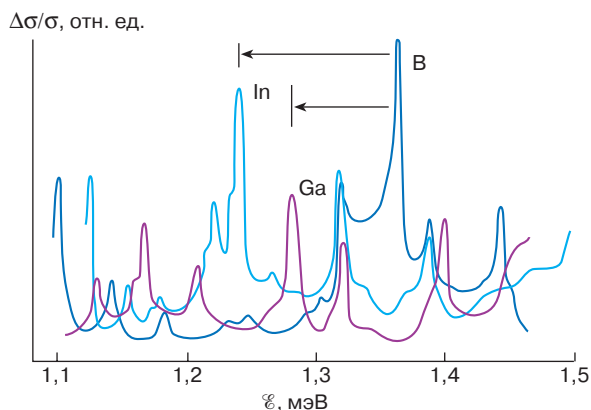


Рис. 2. Участок спектра фотопроводимости Ge, легированного B, Ga и In

Ge предельной очистки. Методика базируется на детально разработанной в [3] фотоэлектрической спектроскопии, основанной на фототермической ионизации и использующей отличия в энергии ионизации исходного состояния примесей различной химической природы. Коротковолновая граница разработанных ЛОВ не позволяет проводить исследования основного состояния, но и спектр возбужденных состояний несет информацию о химической природе примеси. На рисунке в качестве примера приведены участки спектра Ge, легированного бором B, галлием Ga и индием In. Несмотря на то что химический сдвиг возбужденных состояний меньше, чем у основного состояния, высокое разрешение ЛОВ-спектрометра полностью это окупает. Высокая чувствительность компенсирует меньшую заселенность возбужденных состояний. Так, для приведенного участка спектра линия перехода $G^* \rightarrow E^*$ соответствует для Ge:B $\epsilon_B = 1,365$ мэВ, а для Ge:In $\epsilon_{In} = 1,24$ мэВ. Поэтому относительный химический сдвиг составляет $\sim 10\%$, химический сдвиг основного состояния для этого случая $\sim 15\%$, но ширина линий, соответствующих переходам между возбужденными состояниями при концентрации акцепторов $N_A \leq 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (меньше 0,01 мэВ), вчетверо уже линий для основного состояния, полученных лучшими инфракрасными спектрометрами. Заметим, что использовать уширение линий переходов между возбужденными состояниями при увеличении концентрации примесей для определения концентрации предпочтительнее.

Свободные экситоны в Ge. Изучение экситонов (то есть комплексов, состоящих из связанных друг с другом электрона и дырки) [4] на субмиллиметровых волнах вместо обычно применяемого для исследований оптического диапазона волн представляет особый интерес, так как в этих условиях можно наблюдать переходы экситонов из основного состояния в возбужденные. Анализ таких переходов кроме

изучения энергетического спектра свободных экситонов открывает новые возможности исследования их взаимодействия между собой, со свободными носителями и пр.

Эксперименты по фотопроводимости и поглощению проведены начиная со столь малых уровней оптического возбуждения, когда концентрация свободных экситонов составляет $n_3 \approx 10^{10} \text{ см}^{-3}$ (что недоступно другим методам), до $n_3 \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$, когда происходит конденсация экситонов в электронно-дырочные капли.

В качестве примера на рис. 3, а представлены полученные спектры поглощения свободных экситонов, видны линии переходов экситонов с двух

уровней основного состояния в различные возбужденные и полоса фотоионизации. При понижении температуры от 4,2 до 2 К интенсивность первой серии линий ($\mathcal{E} = 2,52; 2,86 \text{ мэВ}$, ...) по отношению ко второй ($\mathcal{E} = 3,14; 3,42 \text{ мэВ}$, ...) экспоненциально падает с энергией активации $\Delta \approx 0,4 \text{ мэВ}$. В спектре фотопроводимости (рис. 3, б) наряду с линиями фотовозбуждения экситонов наблюдается длинноволновая граница фотопроводимости ($\mathcal{E} = 3,8 \text{ мэВ}$). При достаточно высоких T появляется дополнительная полоса фотопроводимости, сдвинутая приблизительно на 0,4 мэВ в меньшие энергии. Из совокупности этих данных получен энергетический спектр непрямых экситонов в Ge. Энергия связи экситонов, измеренная по длинноволновой границе

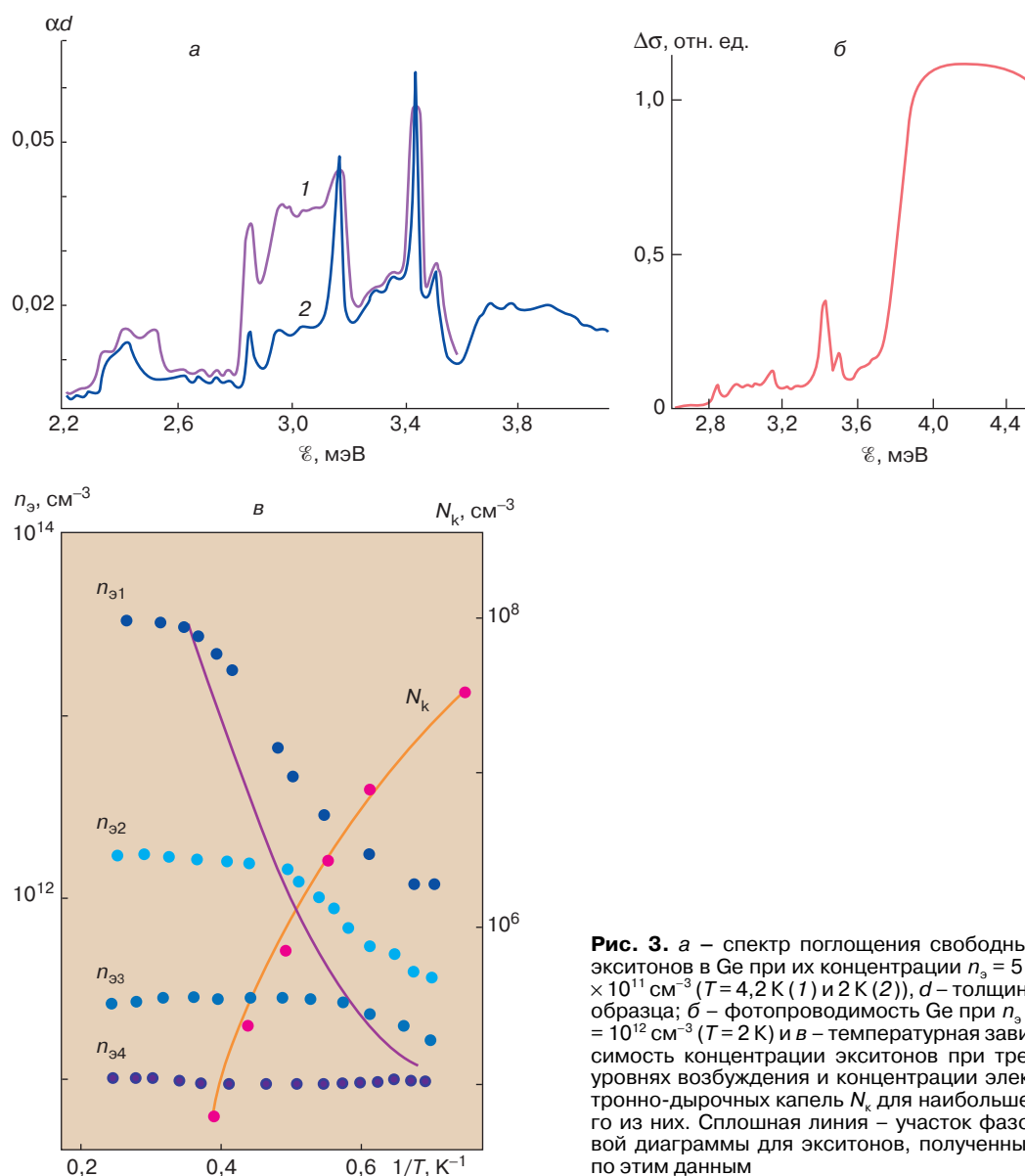


Рис. 3. а – спектр поглощения свободных экситонов в Ge при их концентрации $n_3 = 5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ($T = 4,2 \text{ K}$ (1) и 2 K (2)), б – фотопроводимость Ge при $n_3 = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ($T = 2 \text{ K}$) и в – температурная зависимость концентрации экситонов при трех уровнях возбуждения и концентрации электронно-дырочных капель N_k для наибольшего из них. Сплошная линия – участок фазовой диаграммы для экситонов, полученный по этим данным

нерезонансной фотопроводимости, получается равной 3,8 мэВ. Энергетическое положение второй серии линий фотовозбуждения экситонов дает энергии возбужденных состояний этой серии. Энергетический зазор Δ между уровнями основного состояния экситона по температурной зависимости интенсивности линий поглощения и спектральным измерениям дает $\Delta \approx 0,4$ мэВ. Однако из-за непараболичности экситонной зоны анализ результатов затруднен — измерения температурных зависимостей проводятся при относительно высоких $T = 2-4,2$ К, а дополнительная полоса в спектре фотопроводимости наблюдается лишь при высокой температуре ($T \sim 4$ К), когда линии фотовозбуждения могут искажать вид нерезонансной полосы.

Наряду с этими данными получены сведения о ширине экситонных линий и их зависимости от температуры, проведено наблюдение их расщепления в магнитном поле и поведения в электрическом поле.

При понижении температуры и достаточно большом уровне возбуждения, начиная с некоторой температуры, происходит резкое падение интенсивности всего спектра поглощения. Анализ показал, что эффект определяется уменьшением концентрации свободных экситонов при их взаимодействии за счет конденсации экситонов в электронно-дырочные капли. На рис. 3, в воспроизведены температурные зависимости концентрации экситонов при разных уровнях возбуждения G . Линия, проведенная через пороговые точки, отделяет на диаграмме область, где система однофазна (экситонный газ), от области сосуществования капель и пересыщенного экситонного газа. Там же приводятся полученные данные о концентрации электронно-дырочных капель. Выполненные исследования благодаря чувствительности метода позволили проследить ветвь фазовой диаграммы до наиболее низких температур и малых уровней возбуждения. В частности, показано, что при $n_3 \sim 10^{11}$ см⁻³ концентрация экситонов уже не зависит от температуры вплоть до 0,5 К. Из данных экспериментов рассчитаны работа выхода ф-электронно-дырочной пары из конденсата в экситон, зависимости радиуса капель R от T и G . Установлено, что концентрация капель слабо зависит от уровня возбуждения и резко возрастает с понижением температуры.

H_2^+ -центры. В слабелегированных ($N_D a^3 \ll 1$, N_D — концентрация доноров, a — боровский радиус электрона на доноре) и сильнокомпенсированных полупроводниках ($1 - K \ll 1$, $K = N_A/N_D$ — степень компенсации примесей) энергия локализованных на примесях электронов существенно зависит от мелкомасштабных, размером $R < N^{-1/3}$, флуктуаций примесного потенциала. Особенно важны потенциальные ямы, возникающие при сближении двух заряженных доноров на расстояние, меньшее среднего. При $T \rightarrow 0$ большинство электронов находятся в таких ямах.

Пары с $R \geq a$ могут рассматриваться как аналог молекулярного иона водорода H_2^+ с характерным расстоянием между ядрами R . Это предположение было проверено на n-InSb с $Na^3 = 0,05$ и $1 - K < 0,15$. При исследовании спектров поглощения были обнаружены пики (рис. 4), энергии которых были сопоставлены со спектром H_2^+ -центров. Было получено хорошее совпадение с теорией (рис. 4). По-видимому, это были первые измерения, показавшие существование молекулярных образований из водородоподобных примесных атомов в полупроводниках. В дальнейшем наличие в полупроводниках H_2^+ -центров было доказано экспериментами с n-GaAs и n-InP.

Полученные результаты представляют особый интерес в связи с тем, что наиболее высокочувствительные субмиллиметровые охлаждаемые n-InSb детекторы выполняются именно из такого компенсированного материала. В литературе механизм детектирования излучения в них обычно связывают с разогревом свободных электронов излучением. Однако из приведенных результатов, гальваномагнитных измерений и исследований поглощения ультразвука следует, что в таком материале при низких температурах преобладает проводимость по примесям. Локализация электронов в примесных комплексах определяет фотоионизационный механизм, при котором электроны после поглощения излучения попадают в полосу примесных состояний и, двигаясь по примесям, создают фотопроводимость.

Свободные носители заряда в Ge. Возможности субмиллиметровых исследований свободных носителей заряда проиллюстрируем одним примером.

Циклотронный (ЦР) и электронный парамагнитный (ЭПР) резонансы в субмиллиметровом диапазоне при гелиевых температурах соответствуют квантующим магнитным полям $H(\hbar\omega_c, \hbar\omega_s > kT, \omega_c$ и ω_s — частоты циклотронного и спинового резонансов соответственно). Поэтому им присущи некоторые особенности. ЦР успешно используется для анализа зонной структуры полупроводников и механизмов рассеяния и рекомбинации свободных носителей заряда. В квантовых условиях у электронов при акустическом рассеянии ширина линий может быть обусловлена не только процессами рассеяния, но и сдвигом уровней из-за взаимодействия с рассеивателями. При рассеянии на ионизированных примесях в этих условиях роль эффективного параметра рассеяния начинает играть магнитная длина l . В ЭПР в квантовых условиях следует ожидать новых эффектов: зависимости скорости спиновой релаксации свободных электронов от магнитного поля, особенностей резонанса при сопоставимости зеемановского кванта с характерными энергиями переходов между состояниями локализованных носителей и энергиями активации примесной проводимости.

Нестандартные возможности применения ЦР на субмиллиметровых волнах можно продемонстрировать особенностями его наблюдения в неоднородном

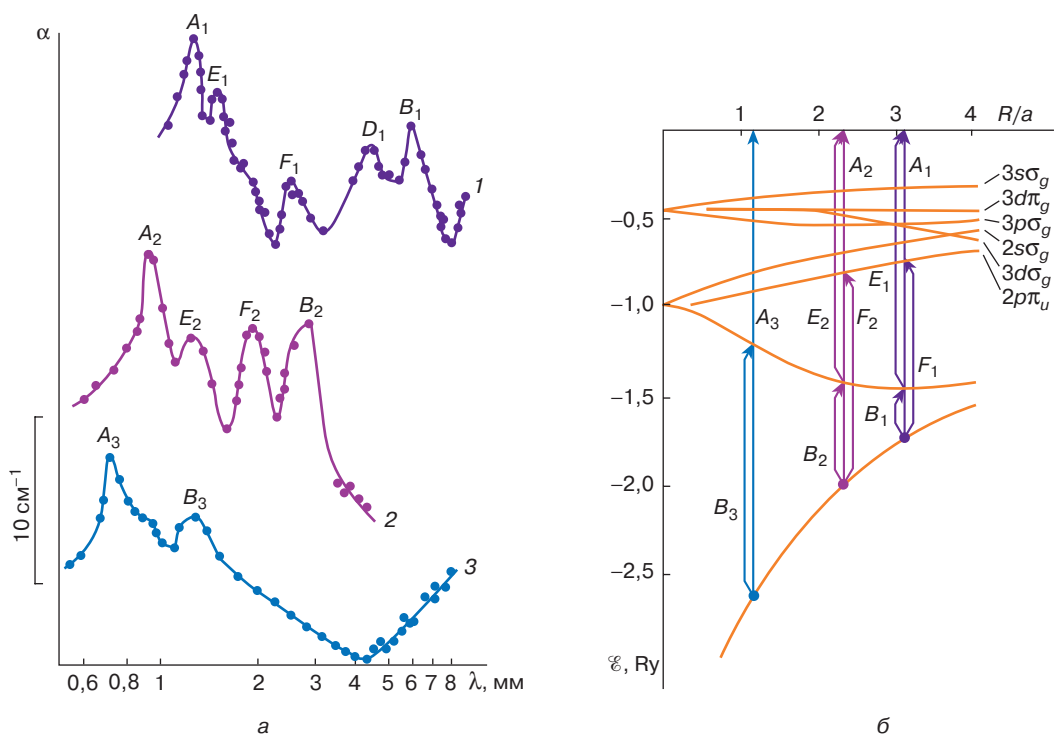


Рис. 4. а – спектры поглощения в антимониде индия (n-InSb) для трех образцов с $N_D = 1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и различной компенсацией $k = N_A/N_D$, где N_D, N_A – концентрации доноров и акцепторов ($k = 0,85$ (1), $0,89$ (2), $0,94$ (3)) при $T = 4,2 \text{ К}$; б – энергетические уровни H_2^+ в зависимости от расстояния между ядрами (в единицах боровского радиуса). Стрелками показаны переходы между уровнями, энергии которых близки к энергиям наблюдаемых пиков для образцов 1–3

полупроводнике, например германии, легированном литием Ge:Li (рис. 5), для которого при определенных концентрациях введенного лития характерно наличие областей конверсии: в матрице, обладающей р-типом проводимости, возникают области перекompенсации, имеющие n-тип проводимости. Обычно наличие и параметры конверсированных областей определяют по косвенным признакам, и получаемые сведения о них оказываются явно недостаточными. Как это ни парадоксально, ЦР позволяет не только обнаружить области конверсии, но и измерить их средний размер, концентрацию, концентрацию примесей в них и матрице, потенциальный барьер между областью и матрицей. Способ основан на том, что при ЦР высокочастотное излучение эффективно взаимодействует только с одним сортом носителей. Так как знак свободных носителей заряда в условиях примесного или термического возбуждения однозначно определяется основной примесью, то ЦР может быть использован для обнаружения областей конверсии: если наблюдаются линии, присущие и электронам, и дыркам, это указывает на существование в образце объемов с различными типами проводимости.

Площадь под линией поглощения ЦР определяется числом резонирующих носителей и служит для

оценки числа свободных электронов и дырок. Спектры фотопроводимости в условиях ЦР прежде всего интересны в другом отношении: кроме информации о положении резонансной линии они позволяют независимо определять типы резонирующих носителей по знаку сигнала фотопроводимости (для неосновных носителей – в данном случае электронов – линии инверсированы). Оценка размера областей

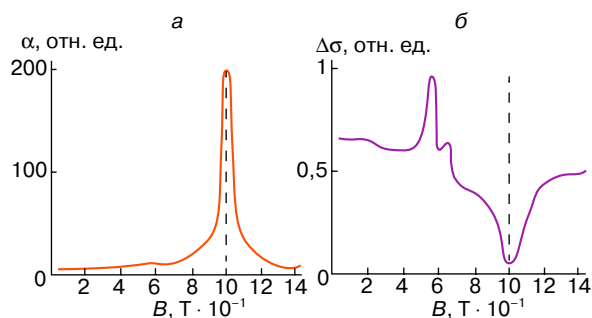


Рис. 5. Спектры поглощения (а) и фотопроводимости (б) на частоте 432 ГГц для Ge:Li с $N_D \approx N_A \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при температуре $T = 13 \text{ К}$ и напряженности приложенного к образцу постоянного электрического поля $E = 0,25 \text{ В/см}$

конверсии r основана на возникновении уширения линии ЦР электронов (свободные электроны есть только в областях конверсии), значение r становится сопоставимым с ларморовским радиусом. Из измерений на столь высокой частоте, когда линия практически не уширена, оценивается вклад рассеяния на нейтральных примесях (в условиях опыта рассеянием на заряженных центрах можно пренебречь), а затем частота наблюдения понижается до значений, когда появляется уширение линий из-за размерного эффекта. Найдя из этих измерений при достаточно низких T (~ 10 К) размер областей конверсии и концентрацию нейтральных центров можно повысить температуру до такой, чтобы стало существенным рассеяние на ионизованных центрах, и тем самым определить раздельную концентрацию примесей (N_D , N_A). Из температурной зависимости площади линий ЦР электронов, регистрируемой по фотопроводимости, можно определить величину потенциального барьера между областью конверсии и матрицей. Полученные данные хорошо согласуются с результатами независимых измерений фототермической ионизации возбужденных состояний доноров и акцепторов, выполненных в рамках тех же субмиллиметровых экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ограничимся приведенными примерами исследований. Элементы экзотики, характерные для экс-

периментов в области, где происходит стык между классической и квантовой физикой, делают тему особенно интересной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гершензон Е.М. Субмиллиметровая спектроскопия // Соросовский Образовательный Журнал. 1998. № 3. С. 92–99.
2. Гершензон Е.М. Современные исследования одиночных атомов // Соросовский Образовательный Журнал. 1995. № 1. С. 116–123.
3. Лифшиц Т.М., Лихтман Н.П., Сидоров В.И. Фотоэлектрическая спектроскопия примесей в полупроводниках // Письма в “Журн. эксперим. и теорет. физики”. 1968. Т. 7, вып. 3. С. 111–114.
4. Белявский В.И. Экситоны в низкоразмерных системах // Соросовский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 93–99.

* * *

Евгений Михайлович Гершензон, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой Московского государственного педагогического университета, член-корреспондент РАО, лауреат Государственной премии СССР. Автор более 400 научных работ, монографий, учебников.