

HOT ELECTRONS IN THE RESISTIVE STATE OF A SUPERCONDUCTOR: A NEW PHENOMENON IN PHYSICS AND A NEW TECHNOLOGY IN ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, AND OPTICS

G. N. GOL'TSMAN

A new phenomenon of superconductive physics, the heating of the electron gas in a thin metal film under conditions of superconducting transition is described. A new fast non-linear element which operates effectively in a wide frequency range from radio waves to visible light is considered. The prospects of using receivers based on this element are discussed.

Описано новое явление в физике сверхпроводников – нагрев электронного газа в тонкой металлической пленке в условиях сверхпроводящего перехода. Рассмотрен новый быстрый нелинейный элемент, эффективно работающий в широкой области частот от радиоволн до видимого света, и перспективы применения основанных на нем приемников.

© Гольцман Г.Н., 1996

ГОРЯЧИЕ ЭЛЕКТРОНЫ В РЕЗИСТИВНОМ СОСТОЯНИИ СВЕРХПРОВОДНИКА – НОВОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ, НОВАЯ ТЕХНИКА В ЭЛЕКТРОНИКЕ, РАДИОФИЗИКЕ И ОПТИКЕ

Г. Н. ГОЛЬЦМАН

Московский педагогический государственный университет

1. ГОРЯЧИЕ ЭЛЕКТРОНЫ В РЕЗИСТИВНОМ СОСТОЯНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Переход металлов в сверхпроводящее состояние при понижении температуры, когда электрическое сопротивление резко падает до нуля, открыт голландским ученым Каммерлинг-Оннесом в 1911 году [1]. После открытия Беднорцем и Мюллером высокотемпературной сверхпроводимости в 1986 году [2] интерес физиков к ней снова резко повысился. Этот фазовый переход чем-то похож на переход пар – жидкость или жидкость – твердое тело, однако он не требует поглощения или выделения скрытой теплоты: это фазовый переход второго рода. Тем не менее здесь также проявляется одна из ярких черт фазового перехода: сверхпроводящий переход осуществляется практически при фиксированной температуре, которая называется критической и обозначается T_c (см. рис. 1). У традиционных сверхпроводников она лежит в области очень низких температур, которые могут быть получены с помощью жидкого гелия (4,2 К) или водорода (21 К), а у новых, высокотемпературных сверхпроводников – с помощью жидкого азота и даже вдвое выше

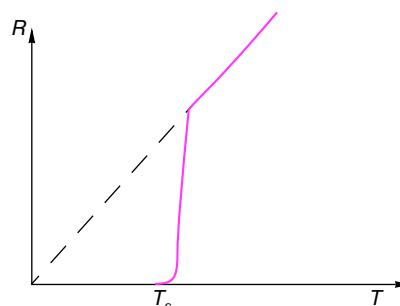


Рис. 1. Температурная зависимость электрического сопротивления металла, переходящего в сверхпроводящее состояние при температуре, равной критической T_c .

температуры его кипения (77 К). Для обсуждаемого случая существенно, что электрическое сопротивление при температуре сверхпроводящего перехода очень чувствительно к малейшему изменению температуры вблизи критической T_c . В этой очень узкой области температур сопротивление меньше, чем у того же металла в нормальном состоянии, но не равно нулю, как в сверхпроводящем. Увеличивая электрический ток, можно понижать T_c и получать такое резистивное состояние при более низкой температуре. Поскольку сверхпроводящий переход — явление электронное, то резистивное состояние сверхпроводника оказывается очень чувствительным к температуре электронов. Таким образом, мы получаем чувствительный “термометр” электронной температуры, что очень полезно не только для изучения неравновесных явлений в металлах, но и для практических применений.

Когда же температура становится выше критической ($T > T_c$, см. рис. 1), мы имеем дело с обычным металлом, у которого электрическое сопротивление относительно слабо зависит от температуры, особенно при низких температурах. При протекании электрического тока в металле выделяется тепло Джоуля–Ленца и металл нагревается. Только избавившись от нагрева целиком всего металла, можно непосредственно изучать неравновесные явления в электронном газе металла. Оказывается, для этого достаточно приготовить металл в виде очень тонкой пленки на диэлектрической подложке и сформировать из нее узкую и короткую полоску (см. рис. 2а, 2б).

Это легко понять, если учесть, что тепло выделяется в объеме металла, а уходит через его поверхность. Для тонкой пленки с уменьшением ее толщины поверхность соприкосновения с подложкой не меняется, а объем пропорционально уменьшает-

ся, так что теплоотвод от единицы объема металла растет (рис. 2а). Однако теплопроводность подложки конечна, что приводит к ее нагреву под пленкой и, в свою очередь, к нагреву пленки. Если же мы сделаем малыи размеры в плане (рис. 2б), мы, конечно же, не изменим отношение объема к поверхности, но существенно уменьшим полное количество выделяемого тепла, позволив ему растекаться по подложке во все стороны. Практически приведенные выше качественные рассуждения приводят к искомому результату для ультратонких пленок (толщиной ~10 нм), имеющих размеры в плане ~1 мкм.

Интересные физические явления, важные также для практических применений, возникают не столько при протекании тока, сколько при взаимодействии с электромагнитным полем. Когда электрон в тонкой металлической пленке поглощает квант энергии электромагнитного поля (фотон), недостаточный по величине для внешнего фотоэффекта, электрон приобретает избыточную энергию, оставаясь в металле. Таких электронов может быть много, однако специальной физической проблемой является возможность приписать этому коллективу определенное значение температуры, то есть рассматривать их как горячие электроны. Эта проблема решается в какой-то мере аналогично имеющей место в идеальном газе. Хотя идеальный газ — самая простая модель обычного реального газа, даже в ней важную роль играют соударения между атомами и молекулами. Именно они обеспечивают установление равновесного распределения молекул по энергии и дают тем самым возможность характеризовать газ определенным значением температуры. В очень тонких металлических пленках при низких температурах межэлектронные столкновения оказываются достаточно частыми, чтобы можно было описывать их коллектив с помощью электронной температуры. Однако ситуация здесь гораздо более сложная, чем в идеальном газе. Для электрона в кристалле есть и другая возможность потерять энергию — возбудить тепловые колебания атомов или молекул, которые распространяются в виде упругих волн в решетке ионов. На языке частиц такие волны называются фононами. В чистых и совершенных металлических кристаллах обычно электрон, обладающий избыточной энергией, быстрее испускает фононы и теряет энергию, чем передает ее другим электронам. Но очень тонкие металлические пленки, как правило, несовершенны, и это меняет ситуацию. В них много кристаллических дефектов и примесей, рассеивающих электроны. Даже то, что электронный газ заключен между двумя поверхностями самой пленки, расположенными на малом расстоянии друг от друга, также приводит к ограничению свободного движения электронов. При рассеянии на примесях, дефектах кристаллической решетки и поверхностях пленки два свободных электрона, оказавшись один раз вблизи друг друга, гораздо дольше остаются рядом, чем в совершенном

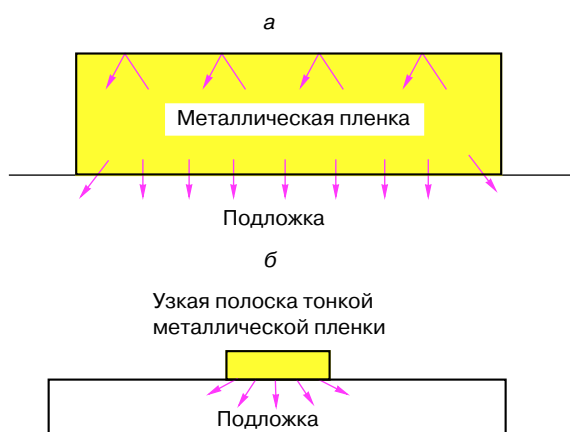


Рис. 2. Металлическая пленка на диэлектрической подложке: а – сплошная пленка, б – узкая полоска. Стрелками показан поток тепла из нагретой пленки.

массивном металле. Оказывается, что межэлектронные столкновения при этом происходят гораздо чаще. Мы не будем углубляться дальше в это сложное квантовомеханическое явление. Подчеркнем лишь еще раз, что оно обеспечивает перераспределение избыточной энергии среди электронов быстрее, чем испускание ими фононов.

При этом энергия не теряется, она остается в электронной подсистеме, перемешивается в ней, и лишь после этого происходит испускание фононов. Этот последний процесс тем не менее достаточно быстрый: характерное время остывания электронной подсистемы, испускающей фононы, близко ко времени электрон-фононного взаимодействия и зависит от вида металла и температуры. Для трех сверхпроводников, которые мы здесь будем рассматривать в качестве конкретных примеров, при температуре, близкой к критической, оно составляет по порядку величины: для тонких пленок Nb $\sim 10^{-9}$ с, для NbN $\sim 10^{-11}$ с, а для высокотемпературного сверхпроводника YBaCuO $\sim 10^{-12}$ с. Все же время межэлектронного взаимодействия, как уже было сказано, еще меньше или того же порядка величины. Существенным следствием является то, что энергия даже большого по величине кванта (для света с малой длиной волны) не теряется даже частично, успевая перераспределиться среди электронов при их столкновении друг с другом. В этом случае величина температуры электронов зависит лишь от мощности излучения и не зависит от частоты.

Однако вопрос о зависимости избыточной электронной температуры от частоты электромагнитного излучения требует еще одного разъяснения. Дело в том, что мы еще ничего не сказали о частотной зависимости поглощения излучения. Оказывается, что для очень тонкой металлической пленки доля поглощенной мощности падающего излучения довольно велика и частотно независима вплоть до очень высоких частот, соответствующих видимому свету или даже ультрафиолетовому.

Таким образом, сопротивление тонкой сверхпроводящей пленки в резистивном состоянии быстро и с высокой чувствительностью реагирует на электромагнитное излучение (растет пропорционально мощности независимо от его частоты в очень широких пределах). На этой основе разработан новый нелинейный элемент, перспективный для использования в целом ряде областей.

2. НОВЫЙ БЫСТРЫЙ НЕЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕМЕНТ В ЭЛЕКТРОНИКЕ, РАДИОФИЗИКЕ И ОПТИКЕ

Нелинейные элементы радиочепей, например диоды, в отличие от линейных (резисторы, емкости, индуктивности) преобразуют спектр сигнала (переменного тока) таким образом, что в нем появляются новые составляющие на таких частотах, которых не было в исходном сигнале. С изобретением радио нелинейные элементы прочно вошли в практику

радиофизики и радиотехники. В оптике нелинейные элементы в принципе используются очень давно. Таким элементом является человеческий глаз, который преобразует световые колебания (очень высокой частоты) в низкочастотные, передающиеся по главному нерву в мозг. В настоящее время в оптике существуют в миллиарды раз более быстрые, чем глаз, нелинейные элементы: это полупроводниковые фотодиоды. Однако между оптическим и радиодиапазоном волн лежит обширная область электромагнитного спектра, где нелинейные элементы далеко не столь эффективны. Поэтому традиционно их разработка в этой области происходила путем продвижения в нее известных для соседних областей принципов и приемов. Однако актуальны и исследования новых физических явлений в этой области и их применение к такого рода устройствам. Одной из таких работ является описываемая здесь.

Преобразование частоты радиоволн полупроводниковыми диодами производится с высокой эффективностью, но только до длин волн, соответствующих долям миллиметра. Им соответствуют частоты $\sim 10^{12}$ Гц — 1 ТГц. На таких высоких частотах применяются диоды с барьером Шоттки: особым образом сформированный контакт металла и полупроводника. В таком контакте можно существенно уменьшить, но невозможно все же совсем избежать электрической емкости, которая шунтирует нелинейное сопротивление контакта; высокочастотные токи замыкаются ею, минуя нелинейную область. Другой эффективный и малошумящий нелинейный элемент, разработанный за последние 10 лет и широко применяемый в настоящее время в технике терагерцовых волн, основан на туннельном контакте двух сверхпроводников, разделенных очень тонкой прослойкой диэлектрика. Его принято называть переходом или контактом сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС); это тоже маленький конденсатор, что на высоких частотах приводит к шунтированию нелинейной области. Кроме того, его сверхпроводящие обкладки на столь высоких частотах, имеют вполне конечное сопротивление, создают дополнительные потери, которые резко возрастают с частотой.

Как уже отмечалось, с противоположной стороны, из оптики в сторону больших длин волн или низких частот проникает другая техника быстрых нелинейных элементов: это полупроводниковые фотодиоды, а также фоторезисторы. Это квантовые приборы в том смысле, что в них квант света рождает пару свободных зарядов — электрон и дырку, которые под действием специально созданного электрического поля движутся в разные стороны, создавая фототок. Однако такие приборы хорошо работают лишь в узком интервале длин волн, когда энергия кванта излучения близка к ширине запрещенной зоны полупроводника. Красная граница внутреннего фотоэффекта как раз соответствует ширине запрещенной зоны. Для видимого света и

близкой к нему части инфракрасного диапазона волн удается сделать не только очень чувствительные нелинейные элементы, но одновременно очень быстрые (время срабатывания может не превышать 10^{-11} с). Однако с увеличением длины волны регистрируемого излучения приходится применять полупроводники со все меньшей и меньшей шириной запрещенной зоны, и это становится в конце концов неразрешимой технологической проблемой.

Существует еще один класс устройств, который служит для регистрации излучения в широкой области спектра от радиоволн до оптики, — это болометры. Болометр — это прибор, в котором поглощение излучения приводит к нагреву какой-то его части, а затем повышение температуры регистрируется каким-либо образом. Например, в сверхпроводящих болометрах для этого используется сверхпроводящий переход. Однако болометры традиционно рассматривались как медленные приборы. Дело в том, что чувствительность и быстродействие болометра связаны друг с другом. Для получения большой скорости срабатывания необходимо быстро, то есть эффективно, отводить тепло, возникшее под действием излучения. А эффективный теплоотвод неминуемо ведет к уменьшению нагрева под действием излучения, то есть к потере чувствительности. Выход здесь может быть только в уменьшении теплоемкости нагреваемого излучением участка болометра. Качественный скачок в достижении одновременно высокой чувствительности и быстродействия болометра возникает тогда, когда мы используем для нагрева лишь электронный газ в сверхпроводящей пленке, а его переход в сверхпроводящее состояние служит термометром для электронной температуры. В предыдущем разделе было показано, как этого достичь, а также приведено по порядку величины быстродействие для трех сверхпроводников. Электронный газ в металле остывает очень быстро, время срабатывания электронного болометра — это время электрон-фононного взаимодействия.

Столь малое время срабатывания делает электронный сверхпроводниковый болометр перспективным для использования в качестве смесителя — основного узла супергетеродинного приемника — в диапазоне от радиоволн до оптики. Супергетеродинные радиоприемники всем хорошо знакомы в повседневной жизни: именно они обычно используются в быту, особенно для приема коротких радиоволн. Когда мы крутим ручку настройки, пытаясь “поймать” определенную радиостанцию, мы на самом деле меняем частоту генератора в радиоприемнике, то есть гетеродина. Под действием созданных им электромагнитных колебаний смеситель преобразует принимаемый сигнал радиостанции в относительно низкочастотный, который в конце концов воспроизводится в виде звука. Супергетеродинные приемники очень чувствительны и избирательны, то есть могут осуществлять прием в очень узкой области частот. Используя в качестве смеси-

теля болометр на горячих электронах в тонкой пленке сверхпроводника, можно создавать эффективные супергетеродинные приемники во всей области электромагнитного спектра от терагерцовых радиоволн до оптики.

Остановимся теперь на двух примерах возможных применений таких приемников.

3. СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ ГЕТЕРОДИННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ И ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ

В последние годы широко исследуются глобальные изменения верхней атмосферы Земли, происходящие в результате человеческой деятельности. Одним из примеров могут служить озоновые дыры.

Озоновый слой в стратосфере Земли защищает жизнь от солнечной ультрафиолетовой радиации, но может быть разрушен в результате сложных химических реакций, в которых промышленные продукты играют, вероятно, роль катализатора. По современным представлениям, ими, в частности, являются соединения хлора. Они образуются, например, из применяемого в ряде областей промышленности хлорфторуглерода — фреона. Открытие весенней Антарктической озоновой дыры привело к осознанию важности изучения стратосферной гетерогенной химии и тех процессов, которые приводят к усиленному разрушению озона в полярных областях стратосферы. Эти процессы долговременные. Даже если бы промышленное использование соединений хлора было бы совершенно прекращено, количество стратосферного хлора продолжало бы нарастать несколько последующих лет из-за уже произведенного и приблизительно 80 лет понадобилось бы, чтобы его количество уменьшилось ниже того уровня, при котором сформировалась Антарктическая озоновая дыра. Века понадобились бы, чтобы количество антропогенного хлора уменьшилось до фонового уровня. Существует, правда, и другая точка зрения, что к разрушению озона приводят вырывающиеся на поверхность в основном вблизи Антарктиды подземные газы. Последние измерения показывают большую потерю озона во все сезоны на средних и больших высотах, чем думали прежде. Современная наука устанавливает существенную связь между химией озона в нижней стратосфере и глобальным изменением климата планеты. Многие атмосферные молекулы и часть атомов, в том числе мельчайшие примеси, включены в эти сложные химические процессы, и только тщательный мониторинг состава атмосферы вместе с построением сложных компьютерных моделей может позволить детально разобраться в этих процессах и найти возможности для управления ими.

Наилучшие перспективы для мониторинга предоставляет субмиллиметровая гетеродинная спектроскопия теплового излучения верхних слоев атмосферы с орбитальных спутников Земли.

Температура в верхних слоях атмосферы довольно низкая и составляет порядка 200 К. Поэтому она излучает слабо, что требует для регистрации достаточно чувствительных приемников. Низкая температура этих слоев определяет также и диапазон излучаемых длин волн: это в основном субмиллиметровый диапазон. Разреженные газы атмосферы — слабо взаимодействующие между собой атомы и молекулы — излучают электромагнитные кванты вполне определенных энергий или, другими словами, совокупность достаточно монохроматических характерных спектральных линий. По частотам этих линий, их интенсивности, степени их монохроматичности и т.д. можно определить содержание всех составляющих атмосферы, включая мельчайшие примеси, температуру, давление, скорость ветра и даже напряженность магнитного поля.

Такое дистанционное зондирование атмосферы и его использование для мониторинга производится с помощью супергетеродинных приемников субмиллиметрового диапазона волн с орбитальных спутников Земли. Для этого приемная антенна сканирует по лимбу атмосферы справа налево и сверху вниз (см. рис. 3), а супергетеродинный приемник принимает узкие линии излучения атмосферных атомов и молекул в чем-то аналогично приему радиостанций бытовым радиоприемником. Примеры построенных спектров для двух различных молекул показаны на рисунках 4а, 4б [3]. По вертикальной оси каждого рисунка отложена величина, пропорциональная логарифму интенсивности излучения слоя атмосферы длиной 500 км при температуре 225 К. В таких экспериментах получают пространственное разрешение по вертикали до 1,5 км, а по горизонтали до 300 км.

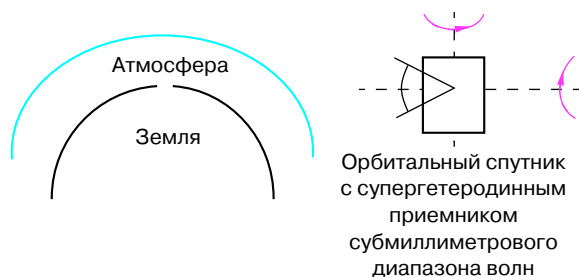


Рис. 3. Схема дистанционного зондирования земной атмосферы с орбитального спутника.

Спектры рисунка 4а, 4б дают представление о линиях одного определенного газа. В атмосфере же их очень много, причем часто представляют интерес несколько различных газов с очень малой концентрацией. Это значит, что необходимо регистрировать слабые линии на фоне большого числа гораздо более сильных. Кроме того, такой анализ нужно проводить для разных участков и охватывать весь терагер-

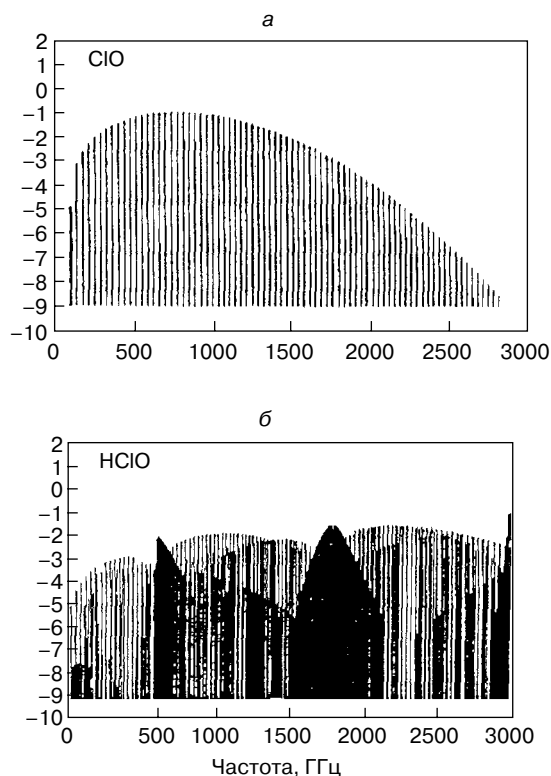


Рис. 4. Спектр ClO (а) и HClO (б) в субмиллиметровом диапазоне волн.

цовый диапазон волн. Однако для существующих супергетеродинных приемников этого диапазона характерно, как уже отмечалось, резкое ухудшение характеристик с ростом частоты. Применение в качестве смесителей новых нелинейных элементов, использующих горячие электроны в резистивном состоянии высокотемпературного сверхпроводника (YBaCuO), позволит существенно расширить частотный диапазон таких приборов и поставить на новый, качественно лучший уровень мониторинг верхних слоев атмосферы Земли.

4. СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ ГЕТЕРОДИННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В РАДИОАСТРОНОМИИ

Субмиллиметровый диапазон волн все еще относительно мало доступен для применения в астрономических наблюдениях. Это связано как с описанными выше принципиальными трудностями разработки приемных устройств, так и с сильным поглощением атмосферы в этой области спектра. В последнее время большие телескопы, похожие на оптические, начали применяться высоко в горах, а также использоваться на борту высотного самолета. Примером могут служить два телескопа с диаметрами зеркал 15 и 10,4 м высоко в горах на Гавайских островах (США) и планируемый в самом близком

будущем самолетный телескоп 2,5 м в диаметре Национального космического агентства США и 4-метровый самолетный телескоп Европейского космического агентства. Поэтому все более актуальной становится разработка соответствующей приемной аппаратуры.

В то же время субмиллиметровый диапазон волн очень важен для астрономии. Он содержит информацию о спектре и пространственном распределении реликтового фонового излучения, об очень удаленных галактиках, о ранних стадиях формирования звезд в нашей галактике и др. Мы остановимся только на одной проблеме, иллюстрирующей возможные применения смесителей на горячих электронах в сверхпроводниках, — на проблеме изучения состава и свойств межзвездной среды.

В плотных молекулярных и пылевых облаках межзвездной среды формируются звезды, а пройдя все стадии своего развития, они чаще всего освобождаются от своих внешних оболочек, сбрасывая их опять в межзвездную среду. Поэтому атомный, молекулярный и изотопный состав межзвездной среды несет информацию о природе этих процессов, об уровне активности звездообразования в данной области пространства.

Необходимость субмиллиметровых исследований для изучения процессов формирования звезд видна уже из того факта, что температура плотного межзвездного газа составляет от ~10 К в холодных областях до ~100 или 200 К в более горячих и обычно более плотных. Соответствующие частоты, когда энергия кванта $h\nu$ близка к тепловой энергии kT , как раз и попадают в субмиллиметровый диапазон волн.

В качестве примера современных исследований [4] приведем спектр излучения Молекулярного Облака в созвездии Ориона (рис. 5), которое видно даже невооруженным глазом около средней из трех звезд, образующих “меч Ориона”. Этот спектр получен на 10,4-метровом телескопе на Гавайских островах с помощью супергетеродинного приемника со смесителем на туннельном контакте сверхпроводник—изолятор—сверхпроводник (см. выше п. 3). В такого рода спектрах присутствуют многие сотни линий, значительная часть которых идентифицируется с вращательными переходами для десятков молекул различного состава от двухатомных до содержащих до десяти атомов. То, что для каждой молекулы наблюдается довольно много линий, существенно повышает надежность ее идентификации. В то же время около половины наблюдаемых

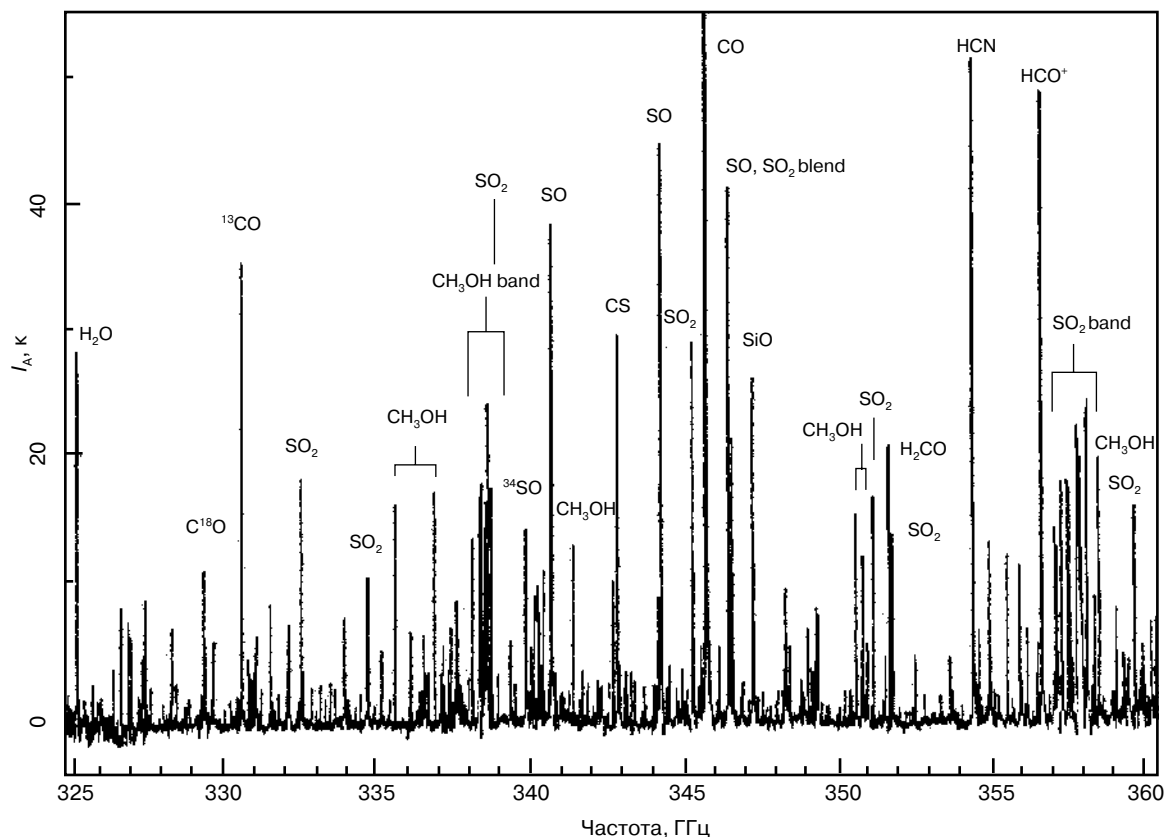


Рис. 5. Спектр излучения молекулярного облака в созвездии Ориона.

линий все еще не идентифицировано. Так как подобные исследования проводятся лишь в последнее время, то здесь можно ожидать еще много новых результатов.

Следует, однако, подчеркнуть, что принимаемое излучение имеет очень слабую интенсивность, наблюдаемые линии очень узкие, а регистрируемый спектр должен перекрывать широкую полосу частот. Это предъявляет столь высокие требования к приемнику излучения, которым невозможно удовлетворить на сегодняшний день для частот больше или порядка 1 терагерца, то есть для частот, всего втрое выше использованных для регистрации спектра, приведенного на рисунке 5. Разработка нового нелинейного элемента, свободного от принципиальных недостатков, присущих уже существующим, открывает широкие возможности новых астрономических исследований в коротковолновой части субмиллиметрового диапазона волн с переходом в длинноволновую часть инфракрасного. Кроме уже упомянутых задач, по-видимому, можно будет исследовать физические и химические свойства очень удаленных молодых галактик, содержащих столь много пыли из-за первых стадий формирования звезд, что изучать их в оптическом диапазоне очень трудно из-за их непрозрачности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение было бы полезно очень кратко остановиться на еще одном интересном примере, иллюстрирующем возможные применения нового нелинейного элемента в оптоэлектронике и вычислительной технике.

Одной из самых актуальных задач современной микроэлектроники является создание все более быстрых микропроцессоров, других логических устройств, повышение интеграции элементов в применяемых в них микросхемах и т.д. Сейчас в мире разрабатывается несколько принципиально новых

направлений развития суперкомпьютеров, не связанных с полупроводниками. В частности, одно из них основано на использовании сверхпроводящих устройств, а другое — одномодовых оптических волокон и различных устройств нелинейной оптики. Часто очень полезным оказывается сопряжение обоих типов устройств. Для этого в настоящее время используют полупроводниковые фотодиоды, сопряжение которых со сверхпроводниковой технологией создает дополнительные трудности. Приемник сверхкоротких оптических импульсов, распространяющихся по одномодовому волокну, может быть сформирован в рамках единой сверхпроводниковой технологии, если он работает на явлении разогрева электронов.

Надеюсь, что рассказ о текущей научной работе вместе с перспективами ее применения оказался интересным и будет полезен для преподавания нескольких разделов физики и на факультативных занятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kamerling-Onnes H.* Leiden Communications. 1911. V. 122b. P. 124.
2. *Bednorz J.G., Mller K.A.* Possible High T_c Superconductivity in the Ba—La—Cu—O System // *Z. Phys.* 1986. B. 64. P. 189.
3. *Waters J.W.* Submillimeter-Wavelength Heterodyne Spectroscopy and Remote Sensing of the Upper Atmosphere // *Proceedings of the IEEE.* 1992. V. 30. P. 1679.
4. *Phillips T.G., Keene J.* Submillimeter Astronomy // *Proceedings of the IEEE.* 1992. V. 80. P. 1662.

* * *

Гольцман Григорий Наумович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и экспериментальной физики Московского педагогического государственного университета, автор более 100 научных работ.