

## Высокочувствительный субмиллиметровый фотоприемник на основе InSb

© Ю.Б. Васильев<sup>¶</sup>, А.А. Усикова, Н.Д. Ильинская, П.В. Петров, Ю.Л. Иванов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 25 декабря 2007 г. Принята к печати 29 декабря 2007 г.)

Исследована субмиллиметровая фотопроводимость электронного газа в объемном InSb. Предложена новая конструкция InSb-фотоприемника в виде плоских спиралей, в которых соотношение длины полосы к ее ширине составляет 2 порядка. Такая конструкция позволяет создавать очень чувствительные приемники с возможностью перестройки пика чувствительности магнитным полем.

PACS: 71.55.Eq, 72.40.+w, 71.70.Di

Недостатком существующих терагерцовых приемников на основе объемных кристаллических полупроводников InSb является их относительно низкая чувствительность по сравнению с кремниевыми болометрами и германиевыми фотоприемниками на основе фототермической ионизации мелких примесей [1]. Низкая чувствительность InSb-приемников является следствием того, что даже при низких температурах ( $T = 4.2$  К) образцы разумных размеров остаются слишком низкоомными, поскольку энергия ионизации примесей очень мала. Увеличение сопротивления приборов и их чувствительности возможно за счет использования для их изготовления наиболее чистых материалов (с концентрацией примесей меньше  $10^{14}$  см<sup>-3</sup> и подвижностью около  $10^6$  см<sup>2</sup>/В·с) (при 77 К) [2]. Уменьшение концентрации примесей сильно ограничено возможностями современных технологий. Известен и применяется метод увеличения сопротивления (и соответственно чувствительности) за счет дозированной компенсации донорных примесей в InSb акцепторами [3]. Как было установлено, при степени компенсации, равной 0.3, при гелиевых температурах электроны находятся в потенциальных ямах флуктуаций кулоновского потенциала ниже порога протекания. Под действием излучения электроны разогреваются и оказываются выше порога протекания. Такие приемники InSb обладают более высокой чувствительностью в отсутствие магнитного поля в широкой спектральной области, но не могут использоваться в качестве селективных детекторов на основе циклотронного резонанса, поскольку их чувствительность в магнитном поле очень низкая.

Нами предлагаются и исследуются фотоприемники новой конструкции на основе объемных кристаллических полупроводников InSb, в которых увеличено соотношение длины приемника к площади поперечного сечения. Методами фотолитографии из тонкой пластины InSb изготавливается спираль, для которой отношение длины к ширине чувствительного элемента составляет несколько порядков. Обнаружено, что даже образцы с

достаточно высокой концентрацией примесей, составляющей несколько единиц  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>, и подвижностью около  $10^5$  см<sup>2</sup>/В·с (при 77 К) становятся при гелиевых температурах высокоомными и обладают высокой чувствительностью к терагерцовому излучению.

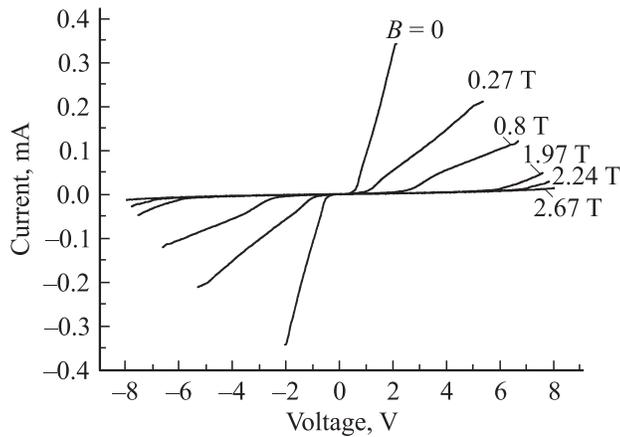
Технология изготовления приемников состоит в следующем.

Из слитка монокристаллического InSb *n*-типа вырезаются пластины толщиной порядка 1 мм, которые утончаются до 200 микрон шлифовкой. На полученной подложке методом стандартной фотолитографии создается маска из фоторезиста требуемой конфигурации — спираль. Через маску мокрым химическим травлением создается рельеф глубиной до 100 мкм. Затем полученный рельеф защищается воском, и мокрым химическим травлением удаляются 100 мкм подложки до полного вскрытия спирали. Отмывка готового элемента производится в четыреххлористом углероде. Полученная фоточувствительная площадка в виде спирали (рис. 1) приклеивается к пластине из монокристаллического InSb *p*-типа для



Рис. 1. Фоточувствительная площадка.

<sup>¶</sup> E-mail: yu.vasilyev@mail.ioffe.ru



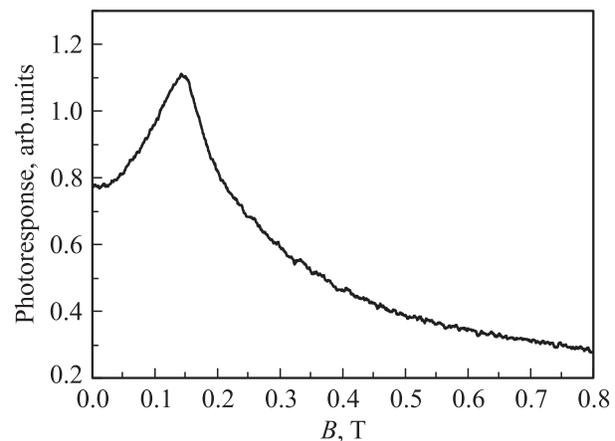
**Рис. 2.** Вольт-амперные характеристики фотоприемника InSb при различных магнитных полях.

придания механической прочности конструкции. Точечные контакты изготавливаются из чистого индия. Были изготовлены несколько фотоприемников одинаковой формы из различных слитков монокристаллического InSb *n*-типа с концентрацией носителей  $(2-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью  $(1-3) \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$  (при 77 К). Все они оказались практически идентичными по своим свойствам. В качестве источника излучения использовались образцы монокристаллического германия. При пропускании импульсов тока они излучают либо спонтанное широкополосное излучение, либо в режиме генерации излучают монохроматическое излучение, длина волны которого перестраивается магнитным полем [4]. Все измерения проведены при температуре  $T = 4 \text{ К}$ . Вольт-амперные характеристики InSb-приемника представлены на рис. 2. Отметим, что даже в отсутствие магнитного поля хорошо видна отсечка по напряжению, т. е. образец находится в высокоомном состоянии при напряжениях, меньших критического. Этот факт позволяет выбрать рабочее напряжение вблизи критического напряжения, так что под действием излучения сопротивление образца претерпевает сильное изменение. С ростом магнитного поля, как видно из рис. 2, сопротивление возрастает и критическое напряжение также растет.

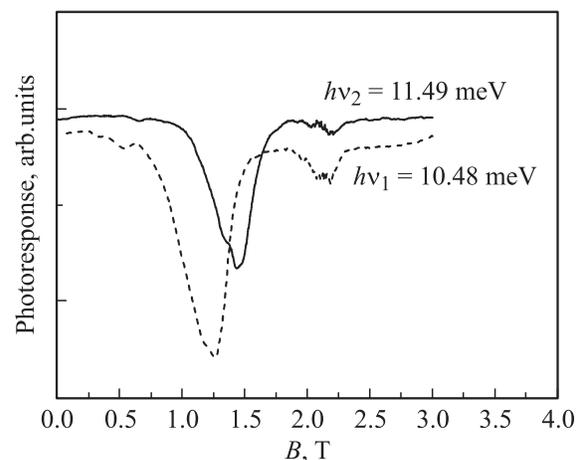
Чувствительность фотоприемника оказалась настолько высокой, что позволила измерить сигнал спонтанного излучения из кристаллов германия, причем соотношение сигнала к шуму составляет несколько порядков. На рис. 3 представлено изменение сигнала фотоприемника в магнитном поле. Поскольку энергия спонтанного излучения соответствует межподзонам переходам в валентной зоне германия в дальней ИК-области, данная зависимость отражает изменение чувствительности фотоприемника с магнитным полем при постоянном значении смещения.

В магнитных полях порядка 1 Т происходит квантование уровней энергии электронов. Это приводит к формированию пика чувствительности, связанного с цик-

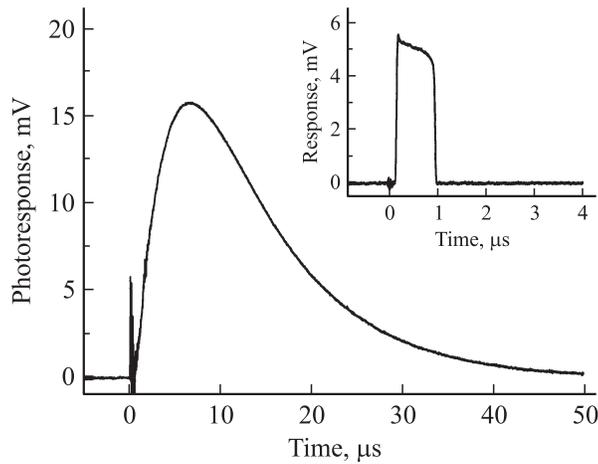
лотронным резонансом. На рис. 4 показана зависимость фотопроводимости от магнитного поля при облучении образца монохроматическим излучением. В качестве источника света в этих измерениях использовался *p*-Ge лазер, длина волны генерации которого перестраивается магнитным полем. На рис. 4 приведены результаты измерений при двух энергиях квантов излучения. Видно, что пик фотопроводимости смещается по магнитному полю при изменении частоты генерации лазера и состоит из двух линий, соответствующих циклотронным переходам свободных электронов и электронов, локализованных на примесях [5]. Высокая чувствительность приемника позволила выявить тонкую структуру в спектрах фотопроводимости InSb *n*-типа. Наряду с основным пиком имеются пики, связанные с фотопроводимостью на примесях. Отметим, что амплитуда дополнительных пиков значительно меньше пика циклотронного резонанса, что не препятствует использованию фотоприемника в качестве селективного.



**Рис. 3.** Зависимость чувствительности фотоприемника от величины магнитного поля.



**Рис. 4.** Изменение фотопроводимости приемника в магнитном поле при облучении монохроматическим излучением с энергией квантов 11.49 и 10.48 мэВ.



**Рис. 5.** Осциллограмма импульса фотопроводимости InSb-фотоприемника в максимуме пика чувствительности. Время фотоответа — 10 мкс. На вставке — осциллограмма фотосигнала приемника Ge, легированного Ga ( $\tau \approx 20$  нс).

Недостатком значительного увеличения сопротивления структур при спиральной форме фотоприемника можно считать уменьшение его быстродействия. Исследования динамики фотопроводимости показали, что величина фотоответа составляет десять микросекунд при измерении в пике чувствительности приемника. На рис. 5 показано, насколько время фотоответа в InSb превышает время фотоответа в германии, где время фотоответа порядка 20 нс. Измерения вне пика чувствительности InSb показали, что время фотоответа возрастает и составляет десятки микросекунд.

Сравнение фотоприемников традиционной прямоугольной формы и спирального, изготовленного из одного слитка InSb, невозможно, в силу того что прямоугольный фотоприемник не дает никакого фотоответа. Сравнение проводилось с наиболее чувствительными германиевыми фотоприемниками, принцип действия которых основан на фототермической ионизации мелких примесей. По чувствительности оба приемника примерно одного порядка, несмотря на то что германиевый приемник значительно массивней ( $5 \times 5 \times 10$  мм), чем спиральный приемник ( $0.1 \times 50 \times 0.8$  мм). Быстродействие германиевого приемника значительно лучше. Однако основным достоинством спирального приемника является его селективность: пик чувствительности можно перестраивать в широких пределах с помощью магнитного поля, благодаря малой эффективной массе электронов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 06-02-17214.

## Список литературы

- [1] E.H. Putley. *Infrared detectors*, ed. by R.D. Hudson, J.W. Hudson (Halsted Press, 1975) p. 30.
- [2] E.H. Putley. *Appl. Optic*, **4**, 649 (1965).

- [3] А.Н. Выставкин, В.Н. Губанков, В.Н. Листвин, В.В. Мигулин. *ФТП*, **1**, 844 (1967).
- [4] Ю.Л. Иванов, Ю.Б. Васильев. *Письма в ЖТФ*, **10**, 613 (1983).
- [5] E. Gornik. *Lecture Notes in Physics* (Springer-Verlag, 1982) v. 177, p. 248.

Редактор Л.В. Беляков

## High sensitive submillimeter InSb photodetector

*Yu.B. Vasilyev, A.A. Usikova, N.D. Il'inskaya, P.V. Petrov, Yu.L. Ivanov*

loffe Physicotechnical Institute  
of the Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Submillimeter photoconductivity has been investigated in bulk InSb. We propose a novel construction of InSb spiral-shaped photodetector with length to width ratio of around 2 orders. Such a construction allows creating very sensitive photodetector with a responsivity peak tunable by magnetic field.