

**РЕКОМБИНАЦИОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В КРЕМНИИ, СТИМУЛИРОВАННОЕ  
ДЛИННОВОЛНОВЫМ ИК-ИЗЛУЧЕНИЕМ**

**Ш.М.Коган, Т.М.Лифшиц, В.И.Сидоров**

Оптическая перезарядка примесных центров, наблюдающаяся при низких температурах в полупроводниках [1], должна приводить к появлению ряда особенностей в поведении полупроводника. В частно-

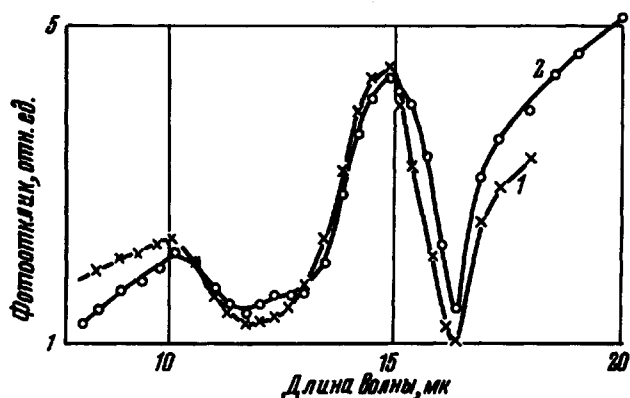
сти, при определенных условиях перезарядка должна увеличивать фотоотклик полупроводника в области примесного поглощения света и, что нам представляется особенно интересным, вызывать появление рекомбинационного излучения, стимулированного светом из области примесного поглощения.

Действительно, рассмотрим полупроводник, легированный акцепторной и донорной примесью, причем предположим, что уровни доноров близки к зоне проводимости, а акцепторов - к валентной зоне. При достаточно низких температурах, когда тепловая ионизация акцепторов и доноров пренебрежимо мала, освещение полупроводника светом, создающим пары электрон-дырка, приведет к перезарядке примесных центров. В этом случае почти все донорные центры заполнятся электронами, а акцепторные - дырками. Если теперь облучить такой полупроводник излучением, соответствующим области примесного поглощения, то фотоотклик такого перезаряженного полупроводника должен увеличиться по сравнению с равновесным случаем как за счет увеличения числа поглощающих центров, так и за счет уменьшения числа центров рекомбинации. Далее, созданные при ионизации примеси свободные носители заряда (в дальнейшем для простоты будем говорить только об электронах) либо захватываются на ионизованные доноры, концентрация которых из-за перезарядки мала, либо рекомбинируют с дырками, связанными на нейтральных акцепторах, концентрация которых велика. Последние переходы в основном излучательные. Отметим, что энергия испускаемых при рекомбинации фотонов - порядка ширины запрещенной зоны полупроводника, т.е. достаточно велика. Таким образом, поглощение фотона длинноволнового излучения должно вызывать испускание фотона коротковолнового излучения со значительно большей энергией.

Экспериментальное подтверждение существования рассмотренного механизма нами было проведено на кремнии с примесями бора и сурьмы<sup>1)</sup> ( $N_D = 8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{Si} = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Образец кремния размерами 2x2x6 мм монтировался в обычный гелиевый криостат, обеспечивающий охлаждение образца до температуры 7 - 9°К. Образец

через холодное окно (фильтр) из сурьмянистого индия освещался модулированным монохроматическим излучением в диапазоне длин волн 8 - 20 мк. Одновременно образец мог освещаться немодулированным излучением от маленькой лампочки накаливания, помещенной в криостат. Рядом с образцом в криостате монтировался серийный германиевый фотодиод со стеклянным входным окном, расположенный так, что он мог зарегистрировать возможное излучение образца. С помощью обычной измерительной схемы, включающей усилитель, синхронный детектор и самописец, регистрировался фотоотклик образца и фотодиода.

Фотодиод не реагировал на включение модулированного ИК-излучения без подсветки от лампочки, либо наоборот, на включение подсвечивающей лампочки без ИК-излучения. При одновременном же



Спектральное распределение фототока образца кремния (2) и германиевого фотодиода (1), отнесенное к монохроматической мощности, падающей на холодный фильтр *In Sb*

облучении образца светом от лампочки и модулированным ИК-излучением от монохроматора появлялся фотоотклик германиевого фотодиода на частоте модуляции ИК-излучения. На рисунке приведена кривая спектрального распределения фотоотклика германиевого фотодиода (кривая 1). Здесь же приведена спектральная кривая фототока образца кремния (кривая 2). Величина сигнала фотодиода, а также фототок

образца зависят от интенсивности немодулированной подсветки. Фото-ток образца под действием подсветки может увеличиваться более чем в 100 раз, при этом вид спектрального распределения фотопроводимости не изменяется.

Совпадение кривых спектрального распределения кремниевого образца и германиевого фотодиода, а также тот факт, что фото-отклик диода возникает только при одновременном облучении образца кремния монохроматическим излучением и подсветкой, определенно указывает на то, что в перезаряженном кремнии возникает рекомбинационное излучение, стимулированное длинноволновым ИК-светом. Созданные ИК-излучением свободные электроны и дырки захватываются на перезаряженные центры рекомбинации: электроны - на нейтральные атомы бора и дырки - на нейтральные атомы сурьмы. Энергия испускаемых при этом фотонов ( $\sim 1$  эв) [2] соответствует области чувствительности германиевого диода.

Таким образом, в описанном эксперименте имело место преобразование длинноволнового излучения в коротковолновое со значительным (в  $\sim 20$  раз) выигрышем в энергии фотонов.

Институт радиотехники  
и электроники  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
7 августа 1965 г.

#### Литература

- [1] С.М.Рывкин. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. Физматгиз, 1963.
- [2] Я.Е.Покровский, К.И.Свистунова. ФТТ, 6, 19, 1964.

---

<sup>1</sup> Авторы благодарят К.И.Свистунову за предоставление этого материала.