

УДК 621.315.592

Յ.Տ.ՏԱՐԿԻՍՅԱՆ, Վ.Ն.ՍՈՐՈՇԻՆ,
Ա.Մ.ՊԱՇԱՏՅԱՆ, Դ.Ա.ԲԱԳԴԱՏԱՐՅԱՆ

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 10,6 μm В ДЫРОЧНОМ ГЕРМАНИИ

Поглощение света в средней и дальней ИК-области в дырочной германии обусловлено в основном прямыми оптическими переходами тяжелых дырок в зону легких дырок (см., напр. [1]). Поскольку величина поглощения при прямых переходах определяется заселенностью начальных состояний в зоне тяжелых дырок, энергия которых E_H зависит от энергии кванта света $\hbar\omega$, то при понижении температуры $T \ll E_H(\omega)$ интенсивность прямых переходов экспоненциально падает ($\sim \exp E_H/T$) и основной вклад в поглощение света $\hbar\omega$ при низких температурах должны давать не прямые фотопереходы дырок. Кроме того, при низких температурах из-за вымораживания носителей на примеси поглощение ИК-излучения может также происходить при оптических переходах носителей с акцепторов в валентную зону.

Настоящая работа посвящена изучению поглощения излучения 10,6 μm в p-Ge в температурном интервале 300÷8К. Исследовались образцы Ge:Ga с концентрацией $N_a - N_d = 3,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $1,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Образцы вырезались перпендикулярно направлению $\langle 111 \rangle$ в виде плоскопараллельных пластин толщиной $d=240 \mu\text{m}$ и $d=980 \mu\text{m}$. Полировка образцов проводилась механически с последующим травлением в CP-4A. Источником ИК-излучения служил одномодовый лазер CO_2 непрерывного действия ЛГ-74, излучение которого модулировалось с частотой ~ 30 Гц. Интенсивность излучения составляла $\sim 0,1 \text{ Вт/см}^2$. Падающая I_0 и выходящая из образца I_1 интенсивность света измерялись пироэлектрическими приемниками [2]. Коэффициент поглощения K рассчитывался из измеряемых I_0 и I_1 с учетом многократного отражения света на границах образца

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-Kd}}{1-R^2 e^{-2Kd}}$$

Предварительными исследованиями было установлено, что коэффициент отражения не зависит от температуры и равен 0,36.

Измерения проводились в оптическом гелиевом криостате с ок-

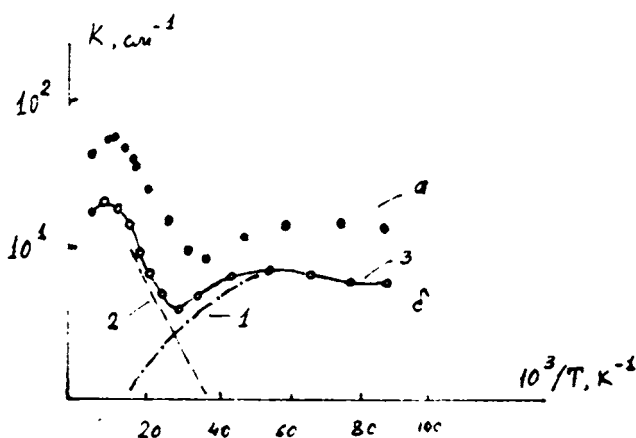
нами из кристаллов ZnSe. Рабочая температура в нем поддерживалась с точностью $\sim 10^{-3}$ K с помощью системы автоматического регулирования "УТРЕКС". Температура измерялась полупроводниковым термометром сопротивления [3], расположенным вблизи образца.

Концентрация свободных дырок определялась из температурной зависимости эффекта Холла*.

На рисунке показана температурная зависимость коэффициента поглощения исследованных образцов. Видно, что в высокотемпературной области ($300 \div 40$ K) с уменьшением температуры коэффициент поглощения возрастает, проходит через максимум и падает.

При температурах ниже 40 K с уменьшением температуры коэффициент поглощения в начале растет, а при температурах ниже 15 K не зависит от температуры в пределах точности измерений.

Различие в поведении $K(T)$ при высоких и низких температурах может быть связано с различными механизмами поглощения света. Действительно, измерения эффекта Холла показали, что в исследованных образцах концентрация свободных дырок p остается постоянной при изменении температуры от 300 K до 100 K. При более низких температурах наблюдается уменьшение концентрации свободных дырок, связанных с вымораживанием носителей на примеси, причем при $T \leq 15$ K практически все дырки локализованы на примесях. Отметим, что в образцах с $N_a - N_d = 1,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ температурная зависимость коэффициента Холла имеет максимум при $T \approx 30$ K, что указывает на образование примесной зоны при таких уровнях легирования германия. Поэтому можно считать, что при температурах ниже 15 K поглощение излучения на длине 10,6 мкм целиком связано с оптическими переходами дырок с акцепторов в валентную зону. Сечение поглощения таких переходов, определенное как $\sigma = K/p$, оказалось приблизительно одинаковым для образцов с разной концентрацией $N_a - N_d$ и равным $2,6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$. Зная сечение поглощения σ и температурную зависимость концентрации дырок на акцепторах, можно определить величину примесного поглощения при различных температурах (кр. 1 на рисунке).



Температурная зависимость коэффициентов поглощения в p-Ge ($N_a - N_d$) $\cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$: а - 14; б - 3,2; поглощение:

1 - примесное, 2 - при прямых переходах, 3 - суммарное.

* Измерение эффекта Холла исследуемых образцов проводилось в Институте физики АН УССР (г. Киев).

Температурный ход коэффициента поглощения в высокотемпературной области указывает на то, что основной вклад в поглощение ИК-излучения $10,6 \text{ мкм}$ дают прямые оптические переходы дырок между подзонами тяжелых и легких дырок.

Величина поглощения при прямых переходах определяется заселенностью начальных состояний $E_H(\omega)$ в зоне тяжелых дырок. Для излучения $10,6 \text{ мкм}$ (117 мэВ) начальная энергия, рассчитанная в приближении изотропных параболических зон, равна $E_H = \hbar\omega \frac{m_2}{m_1 - m_2} = 16,5 \text{ мэВ}$ (эффективные массы тяжелых m_1 и легких m_2 дырок равны $0,35m_0$ и $0,042m_0$ соответственно).

При температуре 300К начальная энергия находится на восходящем участке функции заполнения dp/dE , а при температурах ниже 190К — на спаде dp/dE . Поэтому при изменении температуры от 300 до 190К коэффициент поглощения должен возрастать, а при $T < 190\text{К}$ — падать с понижением температуры, что соответствует температурной зависимости коэффициента поглощения исследуемых образцов. Величина сечения поглощения σ , определенная из экспериментальных значений K , при 300К составляет $6,7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ и близка к величине σ для прямых переходов тяжелых дырок в зону легких дырок, приводимой в работе [4]. На рисунке (кр.2) показано поглощение при прямых оптических переходах при различных температурах, рассчитанное по формуле [5] с учетом измеренной температурной зависимости концентрации свободных дырок $P(T)$ для образцов с $N_a - N_d = 3,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Расчетные и экспериментальные значения коэффициента поглощения нормированы в максимуме зависимости $K(T)$. Там же приведена температурная зависимость поглощения, связанная с прямыми оптическими переходами и фотопереходами носителей с акцепторов в валентную зону (кр.3). Видно, что в исследованных образцах температурная зависимость коэффициента поглощения хорошо описывается двумя указанными выше механизмами поглощения. Вклад же в поглощение излучения на $10,6 \text{ мкм}$ непрямых фотопереходов в $p\text{-Ge}$ при таком уровне легирования кристаллов является, по-видимому, малым.

ЕГУ, ИФ АН Укр.ССР

Поступило 17.10.1990

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.
2. Кременчугский Н.С., Ченилко А.Г., Шульга А.Я. Пирозлектрический приемник излучения поперечного типа для измерения кратковременных импульсов ОКГ. — В кн.: Тепловые приемники измерения: Сб. докл. Всесоюз. сов. (1969), Л., ГОИ, 1971, с.109–110.
3. Бондарев С.Т., Зиновьева К.Н., Воробкало Ф.М., Зарубин Н.И., Немш И.Г., Забродский А.Г., Шлимак И.С. Полупроводниковые термосопротивления для низких и сверхнизких температур. — В кн.: Тр. Всесоюз. сов. по физике низких температур НТ-20. Часть I, М., 1979, с.277–278.
4. Васильева М.А., Воробьев Н.Е., Стафеев В.И. Определение структуры валентной зоны по поглощению света. — ФТП, 1967, т.1, вып.1, с.29–33.

Ա մ փ ո ւ փ ո մ

Փորձնականորեն հետազոտված է p-Ge բյուրեղներում կլանման գործակցի կախվածությունը ջերմաստիճանից $\lambda=10,6$ մկմ ալիքի երկնարևածամբ լազերային ճառագայթման դեպքում: Փորձը կատարվել է ջերմաստիճանների լայն ($300K \div \div 8K$) տիրույթում գերմանիումի տարբեր կոնցենտրացիաների համար: Ստացված արդյունքը միարժեքորեն պարզաբանում և հաստատում է անցքային գերմանիումում ինֆրակարմիր ճառագայթման կլանման ենթադրվող մեխանիզմները: Ապացուցվում է, որ բարձր ջերմաստիճանների տիրույթում ($300K \div 40K$) կլանումը պայմանավորված է ուղիղ օպտիկական անցումներով, իսկ ջերմաստիճանների ավելի ցածր տիրույթում ($40K \div 8K$)՝ խառնուրդային կլանումով:

SUMMARY

The dependence of the absorption coefficient on temperature in the p-Ge crystals by $\lambda=10.6$ mkm laser radiation has been investigated experimentally. The experiment has been carried out in a wide temperature range of $300K \div 8K$ for different concentrations of germanium. The obtained results clearly illustrate and confirm the supposed mechanisms of infrared radiation absorption by hole germanium. It is proved that in the range of higher temperatures $300K \div 40K$ the absorption is due to direct optical transmissions, and in range of lower temperatures $40K \div 8K$ it is due to mixture absorption.