

ОСЦИЛЛЯЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ РЕКОМБИНАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВАРИЗОННОГО ПОЛУПРОВОДНИКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*А.С.Волков, А.И.Екимов, С.А.Никишин, В.И.Сафаров,
Б.В.Царенков, Г.В.Царенков*

Обнаружен осцилляционный характер изменения степени поляризации излучения, обусловленного рекомбинацией ориентированных по спину электронов в варизонном полупроводнике в магнитном поле, в зависимости от энергии излучаемых квантов при неизменном магнитном поле и в зависимости от магнитного поля при фиксированной энергии квантов.

1. В последние годы интенсивно исследуется оптическая ориентация электронных спинов в полупроводниках. Ориентированные по спину электроны возбуждаются циркулярно поляризованным светом, а степень их ориентации непосредственно определяется по степени поляризации рекомбинационного излучения. Магнитное поле H , перпендикулярное возбуждающему лучу света, вызывает прецессию спинов вокруг направления поля. Рекомбинационное излучение складывается из фотонов, рожденных при рекомбинации электронов, спины которых находятся в разных фазах вращения. В результате, в обычном (гомозонном) полупроводнике, где происходящие в разных точках кристалла оптические переходы энергетически эквивалентны, магнитное поле приводит к деполаризации излучения. При этом поляризация сохраняет знак, поскольку число электронов с начальной ориентацией спина всегда максимально из-за процессов рекомбинации и релаксации [1].

2. Качественно иной характер должна носить поляризация рекомбинационного излучения варизонного полупроводника – полупроводника с непрерывно изменяющейся внутри кристалла шириной запрещенной зоны. В таком полупроводнике оптические переходы, происходящие в разных точках кристалла, оказываются энергетически неэквивалентными, и поэтому спектр излучения должен нести информацию о движении носителей и их спинов.

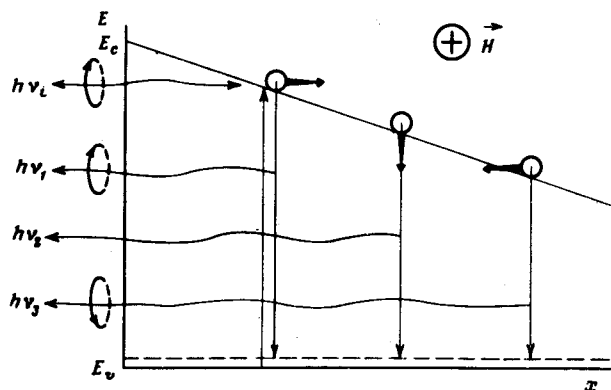


Рис. 1. Энергетическая программа варизонного полупроводника *p*-типа. Магнитное поле (H) перпендикулярно плоскости рисунка

На рис. 1 изображена энергетическая диаграмма варизонного полупроводника *p*-типа, стационарно освещаемого со стороны широкозонной поверхности циркулярно поляризованным светом с энергией квантов $h\nu_i$. Такой свет возбуждает электроны с ориентированными вдоль оси x спинами. Электроны дрейфуют под действием квазиэлектрического поля варизонного полупроводника в направлении уменьшения ширины запрещенной зоны и диффундируют, постепенно исчезая за счет рекомбинации. Электронные спины ведут себя подобным образом с той лишь разницей, что средний спин, приходящийся на один электрон, может исчезать и за счет релаксационных процессов. В поперечном магнитном поле спины будут еще и прецессировать при своем движении. В результате спины приходят в разные точки полупроводника с разными фазами, определяемыми временем движения и скоростью прецессии (величиной магнитного поля). Поскольку разные точки кристалла отличаются энергией излучаемых квантов, это приведет к появлению осциллирующей степени поляризации в спектральной полосе излучения варизонного полупроводника. Степень поляризации излучения, выходящего в противоположном возбуждающему лучу направлении, пропорциональна x -компоненте среднего спина, приходящегося на один электрон. Если спин при своем дрейфово-диффузионном движении совершит один полный оборот, то степень поляризации излучения в зависимости от энергии излучаемых квантов ($h\nu$) дважды изменит знак, совершив одно полное колебание. Например, согласно рис. 1, где условно изображены спины электронов в разных точках полупроводника, рекомбинационное излучение, выходящее в направлении, противоположном возбуждающему лучу, будет право циркулярно поляризованным для энергии квантов $h\nu_1$, неполяризованным при $h\nu_2$ и лево циркулярно поляризованным при $h\nu_3$.

Таким образом, степень поляризации излучения варизонного полупроводника в магнитном поле должна носить знакопеременный осцилляционный характер в зависимости от энергии излучаемых квантов. При увеличении магнитного поля период осцилляций должен уменьшаться из-за увеличения частоты прецессии спина, а затухание осцилляций увеличиваться, отражая расфазировку спинов из-за диффузии.

При фиксированной энергии квантов излучения ($h\nu < h\nu_i$) степень поляризации тоже должна осциллировать с увеличением магнитного поля, поскольку направление спина, с которым электрон приходит в данную точку кристалла (с $E_g = h\nu$) меняется с ростом H вследствие увеличения частоты прецессии.

3. Для экспериментального обнаружения осцилляций поляризации рекомбинационного излучения были использованы варизонные кристаллы p -(GaAl)As, в которых ширина запрещенной зоны уменьшалась с градиентом равным 160 эВ/см , от значения $1,98 \text{ эВ}$ на освещаемой поверхности. Кристаллы были выращены методом жидкостной эпитаксии и легированы цинком до концентрации дырок $(3 \div 5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Регистрировалось рекомбинационное излучение, выходящее в противоположном возбуждающему лучу направлении. Температура кристалла — 77К . Стационарное возбуждение неравновесных носителей осуществлялось циркулярно поляризованным светом He-Ne-лазера ($h\nu_i = 1,959 \text{ эВ}$).

$I^+ - I^-$, отн. ед.

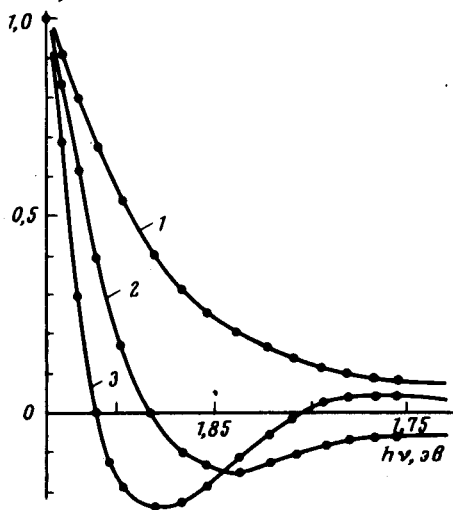


Рис. 2. Зависимость $(I^+ - I^-)$ от энергии квантов $h\nu$ при различных значениях величина магнитного поля H , кэ: 1 — 0; 2 — 1; 3 — 2,7. Ординаты кривых 2 и 3 приведены увеличенными в 3 и 14 раз соответственно

На рис. 2 изображены зависимости разности интенсивностей излучения с правой и левой круговой поляризацией $(I^+ - I^-)$ от $h\nu$ без магнитного поля и при различных значениях поперечного магнитного поля. При $H = 0$ разность $(I^+ - I^-) = f(h\nu)$ экспоненциально падает с уменьшением $h\nu$, оставаясь положительной. В магнитном поле разность $(I^+ - I^-) = f(h\nu)$ носит знакопеременный характер, уменьшаясь по амплитуде с увеличением магнитного поля. Энергетический период осцилляций разности $(I^+ - I^-)$ уменьшается с ростом H .

Как следует из рис. 2 при фиксированном значении $h\nu$ разность $(I^+ - I^-) = f(H)$ также носит осцилляционный характер в зависимости от магнитного поля.

4. Экспериментально обнаруженный эффект осцилляций поляризации рекомбинационного излучения варизонного полупроводника в магнитном поле был теоретически рассмотрен в работе [2]. Приведенные там формулы позволили по полученным экспериментальным данным определить параметры, характеризующие транспорт электронов в варизонном полупроводнике: время жизни неравновесных электронов $\tau = 1,1 \cdot 10^{-9}$ сек, время спиновой релаксации $\tau_s = 4,0 \cdot 10^{-10}$ сек, подвижность неравновесных электронов $\mu_c = 8 \cdot 10^3$ см²/в·сек. При расчетах были использованы значения g -фактора из работы [3].

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
26 апреля 1977 г.

Литература

- [1] R. R. Parsons. *Canad. J. Phys.*, **49**, 1850, 1971; А.И.Екимов, В.И.Сафаров. Письма в ЖЭТФ, **12**, 293, 1970; Б.П.Захарченя, В.Г.Флейшер, Р.И.Джигоев, Ю.П.Вещунов, И.Б.Русанов. Письма в ЖЭТФ, **13**, 195, 1971.
- [2] А.С.Волков, Г.В.Царенков. ФТП, **11**, 1977 (в печати).
- [3] C. Hermann, G. Lampel, C. Weisbuch. *Proc., of XIII Int. Conf. on Phys. of Semicond. Roma*, 1976, p. 130.
-