

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ФОТОИОНИЗАЦИИ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ ИЗ ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Веденев А. С., Ждан А. Г., Рыльков В. В., Шафран А. Г.

Определено сечение фотоионизации примесей Ga в Si (Ga) исходя из измерений фото-холл-эффекта. Разработанный метод не чувствителен к выбору толщины образца, качеству освещаемой поверхности и флуктуациям активности возбуждающего излучения.

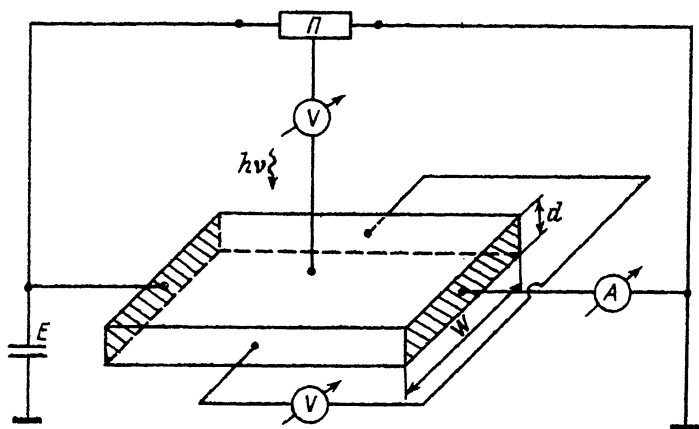
\bar{D} [¹] для экспоненциального закона изменения концентрации носителей заряда по толщине образца получено выражение, связывающее холловский потенциал граней, перпендикулярных градиенту концентрации, с характерной длиной ее изменения. Экспоненциальный закон спада концентрации электронов (дырок) реализуется, в частности, в легированных полупроводниках при примесном монохроматическом фотовозбуждении в направлении распространения излучения. На этой основе развивается метод определения оптических характеристик легированных полупроводников (сечения фотоионизации примеси σ_{ph} и глубины поглощения излучения l_{ph}) из результатов измерений фото-холл-эффекта. Геометрия образца и структурная схема измерений приведены на рисунке. Образец снабжен торцевыми токовыми контактами и тремя потенциальными зондами, два из которых расположены на боковых гранях, а третий — на верхней (освещаемой). Измерения проводятся в области температур вымораживания примеси $T \ll E_0/k \ln(N_v N_a/N_d^2)$, где E_0 — энергия ионизации легирующей примеси, N_v — эффективная плотность состояний в зоне основных носителей заряда (далее рассматривается полупроводник p -типа), N_a и N_d — концентрации акцепторов и доноров соответственно, k — постоянная Больцмана. Интенсивность монохроматического излучения из области примесного поглощения выбирается такой, чтобы концентрация фотодырок p_{ph} существенно превышала равновесную концентрацию дырок p , но была мала по сравнению с концентрацией доноров: $p \ll p_{ph} \ll N_d$. В условиях сильного поглощения [$d \geq (2 \div 3) l_{ph}$, d — толщина образца] концентрация фотодырок изменяется по толщине образца по экспоненциальному закону [²]:

$$p(z) = J(1 - R) l_{ph}^{-1} \tau \exp(-z/l_{ph}), \quad (1)$$

где J — интенсивность излучения, R — коэффициент отражения, $\tau = 1/N_d \alpha$ — время жизни дырок, α — коэффициент их захвата на ионизованные акцепторы, $l_{ph} = 1/N_d \sigma_{ph}$.

Измерения эффекта Холла выполняются в магнитном поле, вектор индукции которого вращается в плоскости, перпендикулярной направлению тока в образце.

При ориентации магнитного поля параллельно освещаемой грани ее холловский потенциал φ_H достигает по абсолютной величине максимального значения [¹]:



Геометрия образца и схема измерений.

$$\varphi_H = \theta E_x \left[l_{ph} - \frac{d}{\exp(d/l_{ph}) - 1} \right], \quad (2)$$

где E_x — продольное электрическое поле, θ — тангенс холловского угла.

Для измерения φ_H используется схема включения образца с одним холловским зондом [3]: φ_H регистрируется вольтметром, включенным между холловским зондом и движком потенциометра П, положение которого выбирается из условия равенства нулю показаний вольтметра в отсутствие магнитного поля. Второй вольтметр, включенный между зондами, расположенными на боковых гранях образца, используется для измерений ЭДС Холла V_H , величина которой, так же как и φ_H , определяется произведением θE_x , но максимальна при ориентации магнитного поля по нормали к освещаемой поверхности:

$$V_H = \theta E_x W \quad (3)$$

(W — ширина образца).

Из (2) и (3) вытекает выражение, связывающее глубину поглощения l_{ph} с отношением амплитудных значений φ_H/V_H :¹

$$\frac{\varphi_H}{V_H} = \frac{1}{W} \left(l_{ph} - \frac{d}{\exp(d/l_{ph}) - 1} \right). \quad (4)$$

Возможны и иные варианты определения l_{ph} , например по значениям холловского потенциала освещаемой и неосвещаемой граней образца. Однако они менее предпочтительны из-за более высокого сопротивления контакта к неосвещаемой грани.

Метод использован для определения σ_{ph} в образцах Si (Ga) с концентрацией Ga $\sim 10^{17}$ см⁻³. Образцы имели форму двойного креста. Точечный контакт на освещаемой грани образца изготовлялся искровым способом: между кремнием (полярность «+») и алюминиевой фольгой (полярность «-») создавался искровой разряд, при котором в кремний вплавлялась алюминиевая капля.

¹ Интересно заметить, что в однородном случае ($l_{ph} \rightarrow \infty$) из (4) следует $(\varphi_H/V_H) = (d/2W) = \text{const}$, т. е. в отсутствие фотовозбуждения и плавной поперечной неоднородности образца (например, в отсутствие градиентов концентрации легирующей и компенсирующей примесей) $\varphi_H W/V_H d = 1/2$. Таким образом, темновые измерения по схеме рисунка позволяют идентифицировать факт электрической неоднородности объекта с характерным масштабом d по отклонению измеренного отношения φ_H/V_H от величины $d/2W$. Этот прием использовался при отборе экспериментальных образцов по критерию «темновой» однородности.

Эксперименты выполнены в оптическом криостате [4] в интервале температур $20 \div 25$ К. Фотовозбуждение осуществлялось CO_2 -лазером ($\lambda = 10.6$ мкм, интенсивность $J \approx 3 \cdot 10^{-4}$ Вт/см²). В условиях опытов концентрация фотодырок $p_{\text{ph}} \sim 10^{10}$ см⁻³ существенно превышала равновесную $p = 10^3 \div 10^7$ см⁻³ и была мала по сравнению с концентрацией компенсирующих доноров $N_{\text{к}} \approx 10^{13}$ см⁻³.

Измерения проводились по двухчастотному методу эффекта Холла на автоматизированной установке [5]. В соответствии с [6] в функции от угла поворота магнита ψ одновременно регистрировались мгновенные значения величин $\varphi_{\text{H}}(\psi)$, $V_{\text{H}}(\psi)$ и силы тока в образце $I(\psi)$ (см. рисунок). Далее осуществлялась синхронная фильтрация полученных цифровых последовательностей сигналов и определялись отношения величин $\varphi_{\text{H}}(\psi)/I(\psi)$ и $V_{\text{H}}(\psi)/I(\psi)$. По этим зависимостям цифровой фильтрацией находились амплитудные значения φ_{H}/I и V_{H}/I , отношение которых и дает необходимую для расчета I_{ph} величину $\varphi_{\text{H}}/V_{\text{H}}$. Этим обеспечивалось надежное подавление токового шума, обусловленного, в частности, флуктуациями интенсивности излучения и нестабильностью токовых контактов образца.

Результаты измерений и определенные по ним значения глубины поглощения и сечения фотоионизации галлия приведены в таблице. Видно, что найденное

Результаты измерений на образцах Si <Ga>

№ образца	$N_{\text{a}}, 10^{16}$ см ⁻³	W , мм	d , мм	$\varphi_{\text{H}}W/V_{\text{H}}d$ (при отсутствии фотовозбуждения)	$\varphi_{\text{H}}W/V_{\text{H}}d$ (при фотовозбуждении)	I_{ph} , мм	$\sigma_{\text{ph}}, 10^{-16}$ см ²
1	8.3	2.0	1.9	0.51	0.130	0.55	2.2 ± 0.1
2	17.4	2.0	2.0	0.49	0.074	0.26	2.2 ± 0.1

из измерений эффекта Холла значение σ_{ph} не зависит от концентрации легирующей примеси и практически совпадает с величиной $\sigma_{\text{ph}} = 2.3 \cdot 10^{-16}$ см², известной из оптических измерений [7].

Развитый «электрический» метод определения оптических констант полупроводниковых материалов обладает рядом преимуществ относительно классической методики оптического поглощения: не критичностью выбора толщины образца, нечувствительностью к качеству обработки освещаемой грани, коэффициенту отражения поверхности и флуктуациям интенсивности возбуждающего излучения. Кроме того, измеряемое в опыте отношение $\varphi_{\text{H}}/V_{\text{H}}$ не зависит (в пределе слабого магнитного поля [1]) от амплитуды магнитного поля и силы тока, протекающего через образец. Наконец, необходимая для расчета σ_{ph} концентрация легирующей примеси определяется по эффекту Холла в едином экспериментальном цикле [8].

Авторы признательны С. Г. Дмитриеву и О. Г. Шагмуратову за дискуссии по работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Веденев А. С., Дмитриев С. Г., Рыльков В. В., Шагмуратов О. Г. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 6. С. 1141—1143.
- [2] Sclar N. // Prog. Quant. Electron. 1984. V. 9. N 3. P. 149—257.
- [3] Кучис Е. В. Методы исследования эффекта Холла. М., 1974. 328 с.
- [4] Веденев А. С., Ждан А. Г., Сумарока А. М., Панков В. Г., Панченко Р. В. // ПТЭ. 1991. № 2. С. 242—243.
- [5] Бугаев В. И., Веденев А. С., Ключкова А. М., Панченко Р. В., Панков В. Г. // Электрон. техн. 1985. Сер. 8. № 3(114). С. 30—32.
- [6] Веденев А. С. // Измерительная техника. 1986. № 11. С. 46—48.

- [7] Hell W., Helbig R., Schulz M. J. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1980. V. ED-27. N 1. P. 10—14.
- [8] Веденеев А. С., Воронкова Г. И., Ждан А. Г., Коган Ш. М., Лифшиц Т. М., Рыльков В. В. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 4. С. 586—592.

Институт радиотехники и электроники РАН
Фрязинская часть

Получена 10.12.1991
Принята к печати 30.01.1992
