

Поверхностная подвижность и распределение электронов в обогащенном слое гетероструктур Ga₂Se₃-GaAs

© В.Ф. Антюшин, И.Н. Арсентьев*, Д.А. Власов

Воронежская государственная технологическая академия,
394017 Воронеж, Россия

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

(Получена 28 июля 1997 г. Принята к печати 11 ноября 1997 г.)

Измерены зависимости дрейфовой подвижности электронов в обогащенных каналах проводимости гетероструктур Ga₂Se₃-GaAs от поверхностной плотности зарядов. Обнаружено наличие зарядовой связи по обогащенному слою, достаточной для создания электротехнических (или микроэлектронных) приборов.

Возможность формирования электронного поверхностного канала проводимости, модулируемого внешним электрическим полем в структурах Me-Ga₂Se₃-GaAs(*n*) показана в работах [1,2]. При определенных условиях обогащенный основными носителями заряда слой в структурах типа металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) отделен от нейтрального объема полупроводника областью обеднения [3,4], что может обеспечивать межэлектродную зарядовую связь по поверхностному каналу проводимости. Для полевых транзисторов или приборов с зарядовой связью на базе таких структур важным параметром является поверхностная дрейфовая подвижность носителей заряда. Численные оценки, выполненные в работах [5-7], показывают, что специфические особенности изолирующего слоя Ga₂Se₃ — наличие стехиометрических вакансий в катионной подрешетке — не ограничивают подвижность электронов в GaAs, если вакансии заполнены нейтральными поляризующимися примесями. Судя по результатам работ [1,2], количество заряженных центров в слоя Ga₂Se₃ незначительно (не более $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Такая поверхностная плотность зарядов соответствует объемной менее $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (при однородном распределении), что на много порядков меньше плотности вакансий. Возможно, примеси в вакансиях катионной подрешетки не ионизованы, так же как в объемных кристаллах соединений A₂^{III}B₃^{VI} [8].

В настоящей работе экспериментально измерена дрейфовая поверхностная подвижность электронов в структурах Ga₂Se₃-GaAs и установлено наличие сильной зарядовой связи по поверхностному электронному каналу проводимости.

При изготовлении структур использовали GaAs *n*-типа проводимости марки АГЧ-25В ориентации [111], сторона В, с концентрацией основных носителей заряда $n_0 \approx (2 \div 4) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. После отмытки пластины GaAs по методике, описанной в работе [9], формировался слой Ga₂Se₃ путем термообработки в парах селеноводорода (H₂Se) с предварительной вентиляцией реакционного объема водородом при температурах вблизи 800 К. Толщина пленок Ga₂Se₃ контролировалась по интерференционным спектрам отражения и составляла $h \approx 0.1 \text{ мкм}$. Для измерения подвижности в поверхностном электронном канале использовалась методика, описанная в рабо-

тах [4,10], с той лишь разницей, что для модуляции поверхностной проводимости в периферийной области измерительного электрода использовались конденсаторные структуры с субмикронным вакуумным зазором, техника изготовления которых описана в работе [11] (см. рис. 1). Такие структуры практически исключают влияние токов утечки подложка-затвор благодаря изолирующим свойствам двуокиси кремния, позволяют создать высокую на-

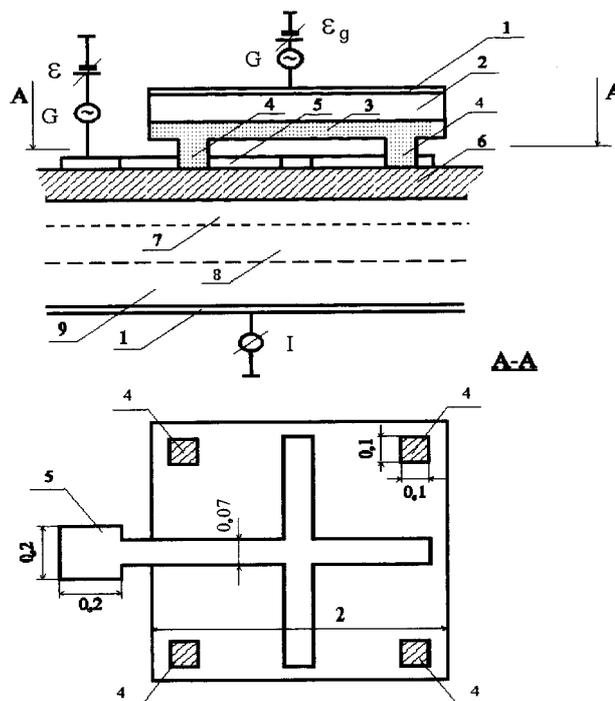


Рис. 1. Схематическое изображение измерительной структуры. 1 — металлические контакты к кремнию и GaAs; 2 — низкоомный (0.1 Ом · см) кремний *n*-типа проводимости; 3 — тонкий (0.05 мкм) окисел кремния; 4 — опорные стойки из окисла кремния; 5 — металлический (Al) измерительный электрод; 6 — слой Ga₂Se₃ (0.1 мкм); 7 — обогащенный электронами слой GaAs; 8 — область обеднения в GaAs; 9 — нейтральный объем GaAs; G — генераторы тестовых сигналов; E, E_g — регулируемые источники постоянного смещения; I — измеритель емкости тока. Размеры элементов структуры даны в мм.

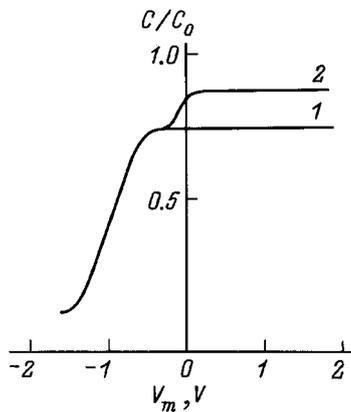


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики измерительной структуры при обедняющем (1) и обогащающем (2) напряжениях на затворном электроде $V_g = \pm 50$ В. Частота $\omega \simeq 6 \cdot 10^4$ Гц, $T \simeq 300$ К.

пряженность электрического поля на поверхности GaAs при небольших напряжениях на затворе и управлять поверхностным электронным каналом в периферийной области. Источники постоянного смещения \mathcal{E} и \mathcal{E}_g управляют состоянием областей пространственного заряда (ОПЗ) под измерительным электродом и в периферийной области соответственно. Генераторы тестового сигнала (G) и измеритель емкости тока (I) позволяют регистрировать емкость затворного электрода и измерительной структуры $\text{Me-Ga}_2\text{Se}_3\text{-GaAs}$.¹ На рис. 2 представлены характерные зависимости емкости измерительной структуры от постоянного смещения на измерительном металлическом электроде (V_m) при обедняющем и обогащающем напряжениях на затворе. Видно, что, когда периферийная область обеднена, емкость структуры (C) остается меньше геометрической емкости изолирующего слоя Ga_2Se_3 (C_0) даже при обогащающем напряжении на металлическом электроде. Это указывает на существование под измерительным электродом обедненной ОПЗ, отделяющей обогащенный слой от нейтрального объема GaAs. Удельная емкость обедненной ОПЗ (C_{SC}) под обогащенным слоем слабо зависит от внешнего напряжения. Значение $C_{SC} = 3.7 \cdot 10^{-7}$ Ф/см² легко определяется по уровню насыщения емкости (рис. 2, кривая 1) и близко к $\epsilon\epsilon_0/L$, где L — дебаевский радиус экранирования в GaAs. Когда периферийная область обогащена, устанавливается зарядовая связь по обогащенному слою. Емкость области обеднения, подключенная последовательно к геометрической емкости изолятора, возрастает, а полная емкость структуры приближается к уровню геометрической емкости (удельная емкость слоя Ga_2Se_3 $C_0 = 1.15 \cdot 10^{-7}$ Ф/см²). При диффузионно-дрейфовом описании переноса зарядов под действием малого тестового сигнала с частотой ω в поверхностном слое пространственный масштаб (λ) неоднородности ам-

плитуды возмущений плотности поверхностного заряда в периферийной области [4]

$$\lambda \simeq \sqrt{\mu_S Q_S / C_{SC} \omega}, \quad (1)$$

где μ_S и Q_S — поверхностные подвижность и плотность зарядов в канале проводимости. Тогда площадь периферийной области, охваченной зарядовой связью $S' \simeq P\lambda$ (P — периметр измерительного электрода под затвором), а результирующая емкость измерительной структуры, нормированная на геометрическую емкость изолятора

$$\frac{C}{C_0} = \left[1 + \frac{C}{C_{SC}} \left(1 + \frac{P}{S} \sqrt{\frac{\mu_S Q_S}{C_{SC} \omega}} \right)^{-1} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где S — площадь измерительного электрода ($P/S \simeq 30$). Связь величины Q_S и напряжения на затворе V_g ($Q_S = C_g V_g$) определяет зависимость емкости измерительной структуры от V_g ($C_g \simeq 1.1 \cdot 10^{-9}$ Ф/см² — удельная емкость затвора). Влияние положительного заряда в тонком (~ 0.05 мкм) слое двуокиси кремния на состояние структуры $\text{Ga}_2\text{Se}_3\text{-GaAs}$ пренебрежимо мало за счет экранирования низкоомным (с удельным сопротивлением 0.1 Ом · см) кремниевым электродом. Имея экспериментальные зависимости (рис. 3), используя выражение (2), нетрудно получить зависимость поверхностной подвижности μ_S от поверхностной плотности электронов в обогащенном слое N_S (рис. 4). Обратную пропорциональную зависимость $\mu_S(N_S)$ при $N_S > 10^{11}$ см⁻² и слабую зависимость от температуры T можно объяснить рассеянием электронов на акустических фоновых. Так, в квазидвумерном канале проводимости при рассеянии на акустических фоновых время релаксации импульса $\tau \sim d(kT)^{-1}$ [12] (d — эффективная ширина канала, k — постоянная Больцмана). Для оценок можно считать, что ширина обогащенного электронами слоя определяется пространственным масштабом нелинейности потенциальной энергии электронов, а последний зависит от средней по ширине канала объемной плотности заряда

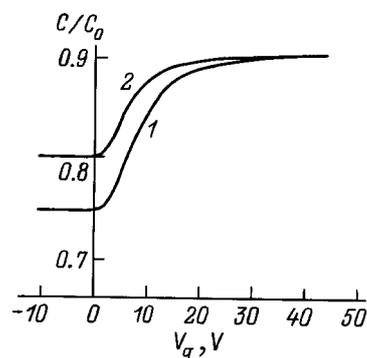


Рис. 3. Зависимость емкости измерительной структуры от напряжения на затворном электроде V_g при обогащающем напряжении на измерительном электроде $V_m \simeq 1$ В, $\omega = 2\pi \cdot 10^4$ Гц, T , К: 1 — 300, 2 — 200.

¹ На рис. 1 приведена лишь часть измерительной схемы T -образного емкостного моста, используемого для увеличения разрешения по емкости. При этом легко достигается разрешение не хуже 0.5%.

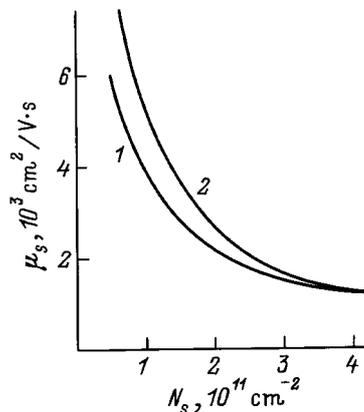


Рис. 4. Зависимость поверхностной подвижности в обогащенном слое структур GaAs–Ga₂Se₃ от поверхностной плотности электронов. *T*, К: 1 — 300, 2 — 200.

(Q_s/d). Тогда $d = \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0kT/e^2(n_0 + Q_s/d)}$ и соответственно

$$d = \frac{\varepsilon\varepsilon_0kT}{e^2n_0} \left[\frac{N_s}{2n_0} + \sqrt{\left(\frac{N_s}{2n_0}\right)^2 + \frac{\varepsilon\varepsilon_0kT}{e^2n_0}} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где e — заряд электрона, ε — относительная диэлектрическая проницаемость, ε_0 — электрическая постоянная. Зависимость (3) с учетом выражения для τ объясняет поведение подвижности электронов при изменениях их поверхностной концентрации. Учитывая оценочный характер использованных формул, можно предполагать, что преобладающим механизмом поверхностного рассеяния электронов (в диапазоне температур 200 ÷ 300 К) в структурах Ga₂Se₃–GaAs является рассеяние на акустических фононах. Полученные значения поверхностной подвижности в структурах Ga₂Se₃–GaAs по порядку величины соответствуют полученным на структурах (AlGa)As–GaAs с модулированным легированием, применяемым для подавления кулоновского рассеяния [13]. Различия в пределах порядка могут быть связаны как с разной техникой изготовления структур, так и разной методикой измерения подвижности. Результаты работы в целом свидетельствуют о пригодности структур Ga₂Se₃–GaAs для создания электротехнических (или микроэлектронных) приборов с зарядовой связью по обогащенному электронами слою.

Список литературы

- [1] Б.И. Сысоев, В.Ф. Антюшин, В.Д. Стрыгин. ФТП, **18**, 1739 (1984).
- [2] Б.И. Сысоев, В.Ф. Антюшин, В.Д. Стрыгин. Поверхность. Физика, химия, механика, вып. 2, 148 (1986).
- [3] Е.И. Левин, А.М. Монахов, А.А. Рогачев. ФТП, **22**, 450 (1988).
- [4] Б.И. Сысоев, В.Ф. Антюшин, М.М. Кипнис. ФТП, **25**, 708 (1991).
- [5] Б.И. Сысоев, Е.В. Руднев, В.Ф. Антюшин. ФТП, **22**, 1871 (1988).
- [6] Б.И. Сысоев, В.Ф. Антюшин, Е.В. Руднев, В.Д. Стрыгин. ФТП, **21**, 1310 (1987).
- [7] V.F. Antyushin, E.V. Rudnev. 35 *Int. Wissenschaftliches Kolloquium* (Ilmenau, DDR, 1990) p. 7.
- [8] В.М. Кошкин. Автореф. докт. дис. (Харьков, 1971).
- [9] В.Ф. Антюшин, Т.А. Кузьменко, В.Д. Стрыгин. В сб.: *Полупроводниковая электроника* [Изв. ВГПИ (Воронеж), **239**, 11 (1985)].
- [10] В.Ф. Антюшин, Б.И. Сысоев. ФТП, **22**, 902 (1988).
- [11] Б.И. Сысоев, В.Ф. Антюшин, А.В. Буданов, А.В. Ассессоров. Поверхность. Физика, химия, механика, вып. 4, 115 (1993).
- [12] S. Kawaji. *J. Phys. Soc. Japan*, **27**, 909 (1969).
- [13] H.L. Störmer, A.C. Gossard, W. Wiegmann, K. Baldwin. *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 912 (1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Surface mobility and electron distribution in accumulation layer at the Ga₂Se₃–GaAs interface

V.F. Antyushin, I.N. Arsentiev*, D.A. Vlasov

Voronezh State Technology Academy,
394017 Voronezh, Russia

* A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The surface electron drift mobility as a function of surface electron density in Ga₂Se₃–GaAs structures has been measured by capacitive coupling technique. The electron accumulation layer transfer efficiency is sufficient for creating charge-coupled devices.

E-mail: phys@comch.ru