

АНИЗОТРОПИЯ ПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ИНВЕРСИОННЫХ КАНАЛАХ НА ВЫСОКОИНДЕКСНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КРЕМНИЯ

З. Д. Квон, И. Г. Неизвестный, В. Н. Овсяк, Г. А. Ягунова

Обнаружена анизотропия рассеяния дырок в инверсионных квантовых каналах на высокоиндексных поверхностях кремния, обусловленная наличием одномерных рассеивателей. Показано, что этими рассеивателями могут служить поверхностные микронеровности, хаотически расположенные в направлении, перпендикулярном линии разориентации поверхности.

Исследования инверсионных каналов на высокоиндексных поверхностях кремния интенсивно ведутся после обнаружения в этих каналах сверхрешеточных эффектов [1, 2]. В настоящей работе сообщается об одном явлении, характерном для такого рода каналов — анизотропии переноса дырок; обусловленной существованием одномерных рассеивателей на вицинальных поверхностях кремния.

Исследованные образцы представляли собой p -канальные МОП транзисторы, изготовленные по обычной технологии на поверхности (21, 2, 2) кремния (эти поверхности наклонены под углом $\theta = 7^\circ 40'$ к поверхности (100) вокруг направления $[01\bar{1}]$). Концентрация доноров в подложке $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, толщина полевого диэлектрика (SiO_2) 1300 \AA , размеры канала $1200 \times 400 \text{ мкм}^2$.

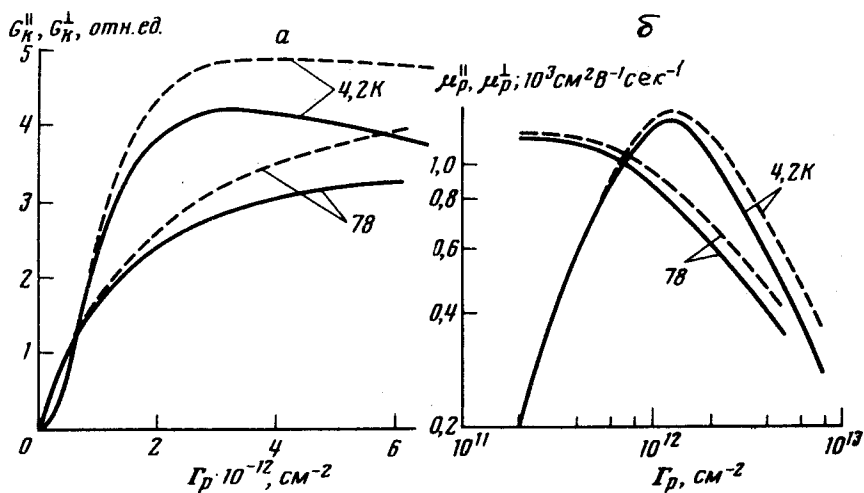


Рис. 1. Зависимости $G_k(\Gamma_p)$ (а) и $\mu_p(\Gamma_p)$ (б) для двух направлений тока дырочного инверсионного канала (пунктир — G_k^{\parallel} и μ_p^{\parallel} , сплошные линии — G_k^{\perp} и μ_p^{\perp})

На рис. 1, а, б приведены зависимости проводимости инверсионного канала G_k и дрейфовой подвижности μ_p дырок в нем от их приповерхностного избытка Γ_p для двух направлений тока — параллельно направлению $[01\bar{1}]$ (G_k^{\parallel} , μ_p^{\parallel}) и перпендикулярно ему (G_k^{\perp} , μ_p^{\perp}) при температурах 4,2 и 78К. Величины проводимости и подвижности совпадают для обоих направлений при $\Gamma_p < 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$; при более высоких значениях Γ_p имеем $G_k^{\parallel} > G_k^{\perp}$ и $\mu_p^{\parallel} > \mu_p^{\perp}$, и разность между этими величинами растет с увеличением Γ_p . Величина анизотропии практически одинакова для обеих температур. Этот эффект появляется только на вицинальных поверхностях кремния, поскольку известно, что на его сингулярных поверхностях (100) и (111) анизотропия подвижности отсутствует [3].

Обнаруженный эффект не может быть связан с изменением закона дисперсии $E(k)$ дырок в канале, поскольку уровень Ферми E_F находится существенно ниже возможной "минигели" в их энергетическом спектре [4] во всем интервале экспериментально достижимых значений Γ_p . Ска-

занное заставляет предположить, что в направлении, перпендикулярном к $[011]$, существует добавочный механизм рассеяния, характеризуемый некоторым временем релаксации τ_p^{∂} . Если этот механизм рассеяния аддитивен с существующими, то $1/\tau_p^{\partial} = 1/\tau_p^I + 1/\tau_p^{II}$; на рис. 2 приведена полученная отсюда зависимость τ_p^{∂} от Γ_p , которая при 4,2К оказалась соответствующей закону $\tau_p^{\partial} \sim \Gamma_p^{-n}$, где $n = 1,6 \pm 0,1$. При 78К наклон этой зависимости несколько убывает при уменьшении Γ_p .

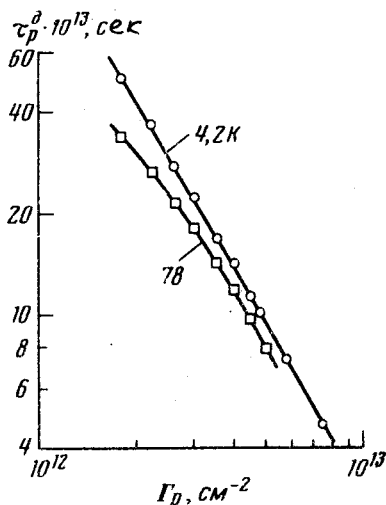


Рис. 2. Зависимость времени релаксации дополнительного механизма рассеяния τ_p^{∂} от приповерхностного избытка дырок Γ_p

Сильное падение τ_p^{∂} с ростом Γ_p (и, следовательно, с уменьшением толщины канала $d \sim \Gamma_p^{-1/3}$) указывает на то, что τ_p^{∂} определяется рассеянием на микронеровностях границы раздела вичинальной поверхности кремния и окиси кремния. Однако его анизотропный характер может проявиться только в том случае, если эти неровности расположены хаотически только в одном направлении, перпендикулярном к $[011]$. Ранее в [5, 6] была рассмотрена задача о рассеянии носителей заряда в тонкой квантовой пленке или инверсионном канале с шероховатой поверхностью, когда внутри пленки (канала) отсутствует рассеяние частиц потенциальными полями, а единственной причиной рассеяния является нерегулярность поверхности, задаваемая двумерной случайной системой неровностей с некоторыми характерными размерами. Было показано, что если носители заполняют только основную подзону квантования, их время релаксации зависит от толщины d пленки или канала как $\tau \sim d^{-6}$. В нашем случае условие заполнения только основной подзоны квантования строго выполнено при 4,2К во всем исследованном диапазоне значений Γ_p . С учетом того факта, что неровности в нашем случае хаотизированы только в одном направлении, результаты работ [5, 6] приводят к зависимости $\tau \sim d^{-5}$ ¹⁾ или, иначе, $\tau \sim \Gamma_p^{-5/3}$. Близкую к этой зависимости дает также оценка рассеяния на возмущениях потенциала U_0 , вызываемых наличием одномерных неровностей. Полагая $U_0 \sim E_s H$, где $E_s \sim \Gamma_p$ — напряженность электри-

¹⁾ На это обстоятельство обратил наше внимание А.В. Чаплик.

ческого поля на поверхности полупроводника и H — характерная высота неровностей, получим в борновском приближении (при $E_F > U_0$) сечение рассеяния $\sigma \sim U_0^2/E_F \sim \Gamma_p$, откуда $\tau \sim \Gamma_p^{-3/2}$.

Поскольку экспериментально полученная зависимость $\tau_p^d(\Gamma_p)$ близка к теоретическим, можно уже определенно утверждать, что наблюдаемая анизотропия обусловлена наличием на высокоиндексных поверхностях кремния одномерной системы неровностей, распределение которых хаотизировано только в направлении "скоса" поверхности.

Описанный механизм анизотропии переноса дырок должен приводить и к анизотропии переноса электронов. В электронных инверсионных каналах на таких же поверхностях как по данным работы [1], так и по нашим данным, действительно существует анизотропия проводимости, однако в данном случае она может быть обусловлена еще и междолинным рассеянием [7], что затрудняет пока однозначное изучение обнаруженного эффекта в этих каналах.

По данным дифракции медленных электронов известно, что на атомарно чистых вицинальных поверхностях кремния существует одномерная периодическая система ступенек высотой $H = a/2$, где $a = 5,43 \text{ \AA}$ — постоянная решетки кремния, и террас длиной $L = H/\sin \theta$ [8]. Если эти ступеньки сохраняются на границе раздела Si — SiO₂, можно предположить, что нарушение периодичности в распределении этих ступенек и выступают в роли одномерной системы рассеивающих неровностей.

В заключение следует отметить, что данные системы предоставляя удобную возможность для непосредственного исследования рассеяния на поверхностных неровностях, поскольку "фоновое" — прежде всего, кулоновское — рассеяние автоматически учитывается при определении τ_p^d .

Авторы выражают благодарность за обсуждение результатов работы А.В. Чаплику, М.В. Энтину и Э.М. Баскину.

Институт физики полупроводников
Академии наук
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
16 июля 1980 г.

Литература

- [1] T. Cole, A. A. Laknani, P. J. Stiles. Phys. Rev. Lett., **38**, 722, 1977.
- [2] Proc. of The XIV-th International Conference on Semiconductor Physics, Edinburg, 1978.
- [3] O. Colman, R. Bate, J. P. Mize. J. Appl. Phys., **39**, 1923, 1968.
- [4] В.П. Петров. ФТП, **12**, 380, 1978.
- [5] А.В. Чаплик, М.В. Энтин. ЖЭТФ, **55**, 990, 1968.
- [6] М.В. Энтин. ФТТ, **11**, 958, 1969.
- [7] T. Ando. Proc. 3-rd International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems, Japan, p. 607, 1979.
- [8] B. Z. Olshanetsky, A. A. Shklyayev. Surf. Sci., **82**, 445, 1979.