

## КОНЦЕНТРАЦИОННЫЙ ЭФФЕКТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЫШЬЯКА В КРЕМНИИ

И. Н. МАГДЕН, Н. А. КАЛЬНЕВ

Монокристаллический кремний является наиболее интенсивно исследуемым полупроводниковым материалом [1—3]. В последнее время значительно повысился интерес к поведению мышьяка в монокристаллах кремния [4, 5]. При этом предлагавшиеся модели его распределения в рамках диффузионной теории не в состоянии объяснить обнаруженные динамические эффекты на границе раздела твердой и жидкой фаз, которые определяют концентрационный профиль атомов примеси.

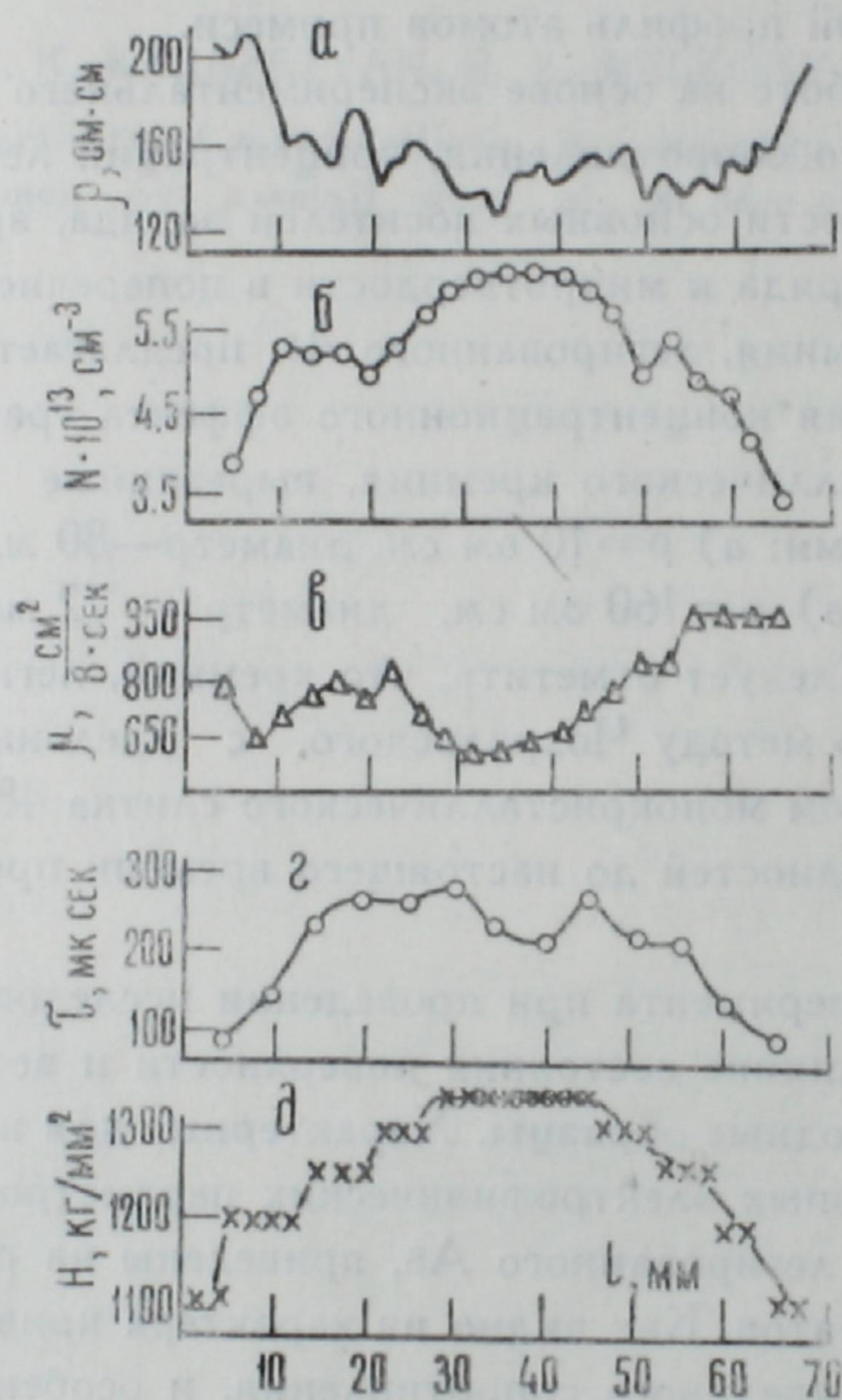
В настоящей работе на основе экспериментального исследования распределения удельного сопротивления, концентрации легирующей примеси, холловской подвижности основных носителей заряда, времени жизни неосновных носителей заряда и микротвердости в поперечном сечении высокоомных образцов кремния, легированного As, предлагается возможный механизм возникновения концентрационного эффекта грани. Исследовались образцы монокристаллического кремния, вырезанные из слитков со следующими параметрами: а)  $\rho=10$  ом см, диаметр—80 мм; б)  $\rho=120$  ом см, диаметр — 48 мм; в)  $\rho=160$  ом см, диаметр — 72 мм; г)  $\rho=200$  ом см, диаметр — 50 мм. Следует отметить, что кремний, легированный мышьяком, выращенный по методу Чохральского, с удельным сопротивлением 150 ом см и диаметром монокристаллического слитка 48—80 мм из-за ряда технологических трудностей до настоящего времени промышленностью не был получен.

Постановка эксперимента при проведении исследований была такова, чтобы исключить влияние состояния поверхности и воздействие температурных полей на исходные образцы. Характерные для исследуемых слитков распределения основных электрофизических параметров по сечению монокристалла кремния, легированного As, приведены на рисунке. Перейдем к обсуждению результатов. Как видно из характера кривой квазиравномерного распределения удельного сопротивления, и особенно это проявляется для Si с концентрацией примеси  $n=4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, создается впечатление, как это и отмечалось ранее для монокристаллического кремния малого диаметра [6], что при низкой степени легирования донорная примесь As не проявляет способности к преимущественной сегрегации в пределах грани (111). Этот факт свидетельствует о стремлении температурного градиента к нулю в области границы раздела фаз кристаллизовавшееся вещество—расплав, что приводит к исключению из общего потока переносимой примеси составляющей, обусловленной действием эффекта Соре, как это наблюдалось в [7], и определяемой выражением

$$j = -D \frac{Q^* N}{R T^2} (\text{grad } T).$$

Здесь  $T$  — абсолютная температура на границе раздела фаз,  
 $N$  — концентрация растворенного мышьяка в кремнии,  
 $Q^*$  — теплота переноса.

При такой постановке вопроса задача определения концентрационного профиля As в кремнии значительно упрощается и решается в рамках модифицированной модели диффузии по вакансиям с двумя уровнями и образованием внутреннего электрического поля, вызванного наличием только примесного градиента. Приближенность вышеуказанного классического подхода становится очевидной, если рассмотреть аномальный характер кривой распределения концентрации (рис., б) и имеющей почти вид зеркального отображения кривой распределения подвижности основных носителей заряда (рис., в).



Распределение электрофизических параметров в поперечном сечении монокристалла кремния: а) удельного сопротивления, б) концентрации примеси, в) подвижности основных носителей заряда, г) времени жизни неосновных носителей заряда, д) микротвердости.

Колоколообразный вид распределения примеси в центральной части монокристалла с довольно резким переходом через минимальное значение и асимметричными максимумами в периферийной области слитка свидетельствует об образовании в объеме вещества при его выращивании температурной неоднородности, которая приводит к гомогенной пластической деформации кремния и даже при почти абсолютном совпадении тетраэдрических ковалентных радиусов ионов мышьяка ( $r_0 = 1,18 \text{ \AA}$ ) и кремния ( $r_0 =$

$= 1,173 \text{ \AA}$ ) в монокристалле возникают значительные внутренние напряжения, что дополнительно подтверждается наличием соответствующего максимума в распределении микротвердости в поперечном сечении (рис., д).

Действие температурного градиента, по-видимому, не распространяется на примеси, образующие в  $Si$  глубокие уровни, которые ответственны за распределение времени жизни неосновных носителей заряда. На рис., г показано, что время жизни дырок у кремния, легированного  $As$ , большое и характер распределения его в объеме довольно монотонный.

Оценивая динамические процессы, протекающие в поперечном сечении кристалла, можно заключить, что на границе раздела твердой и жидкой фаз возникают два встречно направленных потока  $As$ , различных по своей природе, причем доминирующим является термодиффузионный механизм переноса примеси, что приводит к резкому проявлению эффекта грани как в отношении концентрации  $As$ , так и подвижности носителей.

Теоретический анализ сравнительной роли концентрационной диффузии и эффекта Соре с учетом временной зависимости протекания процесса представляется крайне желательным и может быть выполнен в случае определения численного значения теплоты переноса мышьяка в кремнии.

Одесский государственный  
университет

Поступила 30.V.1974

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Г. М. Авакьянц и др. ФТП, 5, 809 (1971).
2. Н. А. Кальнев, И. Н. Магден. Изв. АН АрмССР, Физика, 9, 532 (1974).
3. Ю. А. Евсеев, И. Н. Магден, В. Е. Челноков. ФТП, 4, 1432 (1970).
4. F. N. Schwettmann. Appl. Phys. Lett., 22, 570 (1973).
5. R. B. Fair, G. R. Weber. J. Appl. Phys., 44, 280 (1973).
6. М. Г. Мильвидский, О. Г. Столяров, А. В. Беркова. ФТТ, 6, 3259 (1964).
7. И. Н. Магден, Ю. А. Евсеев, В. Е. Челноков. ФТП, 7, 858 (1973).

#### ԿՐԵՄՆԻՈՒՄԻ ՄԵՋ ԶԱՌԻԿԻ ԲԱՇԽՄԱՆ ԿՈՆՑԵՆՏՐԱՑԻՈՆ ԷՖԵԿՏ

Ի. Ն. ՄԱԳԴԵՆ, Ն. Ա. ԿԱԼՆԵՎ

Զառկվով լեզիրացված կրեմնիումի բարձրահամ մոնոքրիստալներում հայտնաբերված է նիստի կոնցենտրացիոն էֆեկտ:

#### CONCENTRATION EFFECT OF THE DISTRIBUTION OF ARSENIC IN SILICON

I. N. MAGDEN, N. A. KALNEV

A pronounced concentration face effect in high-resistance arsenic doped silicon monocrystals was observed. On the basis of experimental investigation of the resistivity distribution, the concentration of admixture, the Hall mobility of majority charge carriers and the lifetime of minority carriers, the possible mechanism of the occurrence of this effect is proposed.