

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТОВ УМНОЖЕНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КАРБИДКРЕМНИЕВЫХ Р–N-ПЕРЕХОДАХ

Шестеркина А.А.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск

Аннотация. Проведен расчет зависимости коэффициентов умножения электронов и дырок от приложенного напряжения в карбидкремниевых р–n-переходах политипа 4Н с напряжением лавинного пробоя 30 В – 30 кВ в диапазоне температур 250 – 500 К. Исследованы новые аналитические выражения для аппроксимации этих зависимостей. В диапазоне изменения коэффициентов умножения от 1,01 до 3,0 относительная среднеквадратичная ошибка аппроксимации (M_n-1) составляет 3 %, (M_p-1) – 7%.

Ключевые слова: карбид кремния, SiC, р–n-переход, электрон, дырка, лавинное умножение, температура, аппроксимация

Умножение носителей заряда в обратносмещенных р-n переходах вследствие ударной ионизации играет основную роль в определении свойств многих полупроводниковых приборов: лавинных фотодиодов, лавинных транзисторов, тиристоров. Количественной характеристикой процесса лавинного умножения являются коэффициенты умножения носителей заряда:

$$M_{n,p} = \frac{1}{1 - I_{n,p}},$$

где I_n, I_p - ионизационные интегралы электронов и дырок, соответственно

$$I_n = \int_0^L \alpha_n \exp \left[- \int_0^x (\alpha_n - \alpha_p) dx' \right] dx,$$

$$I_p = \int_0^L \alpha_p \exp \left[\int_x^L (\alpha_n - \alpha_p) dx' \right] dx,$$

α_n, α_p - коэффициенты ударной ионизации носителей заряда, L - ширина области объемного заряда.

Неотъемлемой частью работы полупроводниковых приборов и научных исследований является влияние температуры окружающей среды. Поэтому исследование температурной зависимости коэффициентов умножения носителей заряда в р-n переходах на основе карбида кремния является актуальной задачей.

Температурная зависимость коэффициентов умножения определяется температурной зависимостью коэффициентов ударной ионизации.

Проведен анализ полевой и температурной зависимости коэффициентов ударной ионизации в карбиде кремния. Полевая зависимость коэффициентов ударной ионизации описывается выражением

$$\alpha(E) = A \exp \left(\frac{-b}{E} \right),$$

где A и b – параметры, определяемые экспериментально.

Температурная зависимость учитывается моделью ВанОверстритена-ДеМана вида

$$\alpha(E) = \gamma A \exp \left(- \frac{\gamma b}{E} \right), \quad \gamma = \frac{\tanh(h\omega_{op} / 2kT_0)}{\tanh(h\omega_{op} / 2kT)}$$

где γ с энергией оптического фонона $h\omega_{op}$ выражают температурную зависимость от фононного газа, против которого ускоряются носители. Для анализа взят карбид кремния политипа 4Н с параметрами из [1] $A = 3,44 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$, $b = 2,58 \cdot 10^7 \text{ В/см}$ - для электронов и $A = 3,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-1}$, $b = 1,7 \cdot 10^7 \text{ В/см}$ - для дырок, $h\omega_{op} = 106 \text{ мВ}$. Согласно значениям этих параметров, отношение коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок в SiC очень

сильно зависит от напряжённости электрического поля. При этом коэффициенты ионизации дырок более чем на два порядка больше, чем коэффициенты ионизации электронов.

Используя эту модель были рассчитаны полевые зависимости коэффициентов ударной ионизации электронов и дырок в политипе 4H-SiC при различных температурах

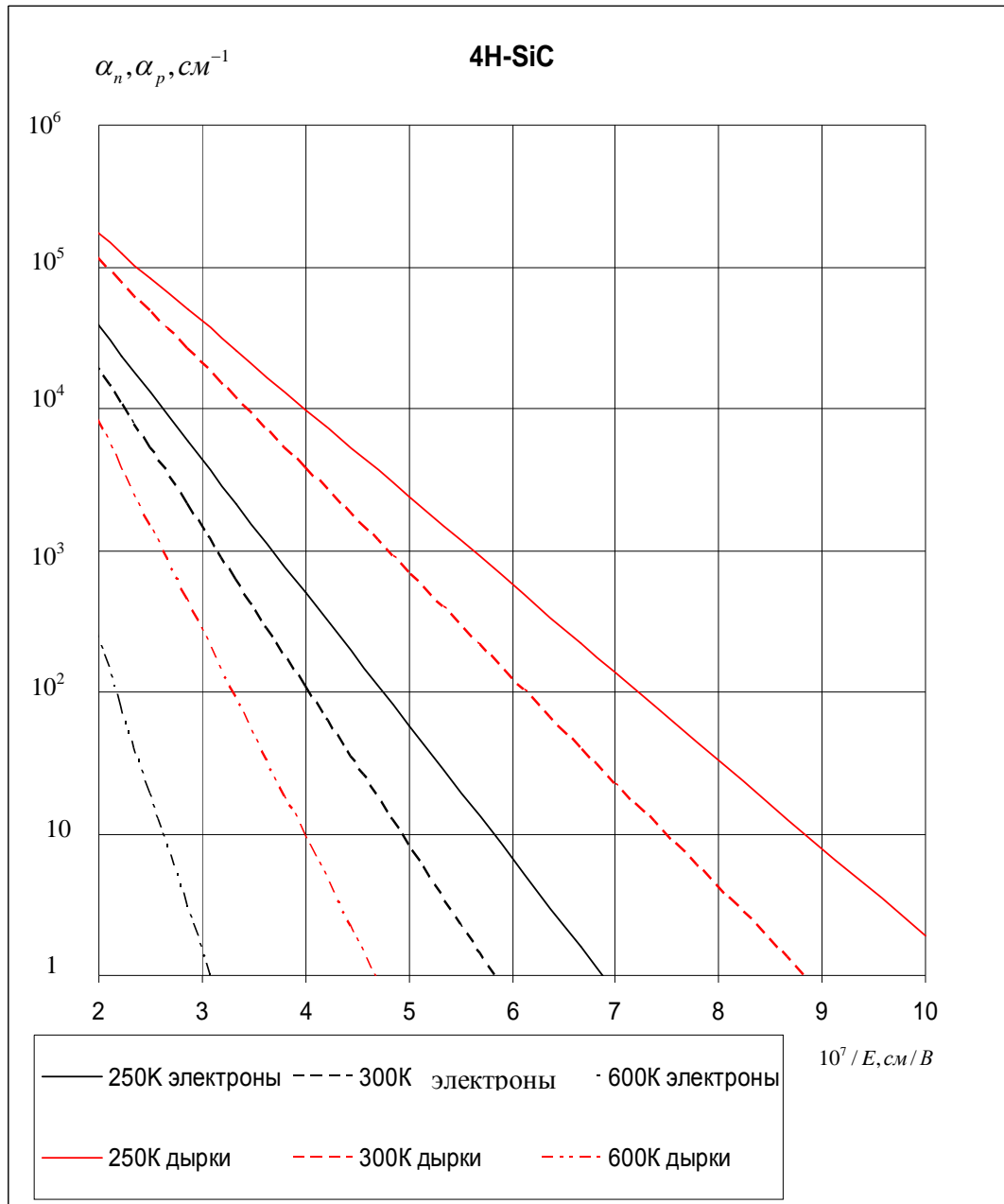
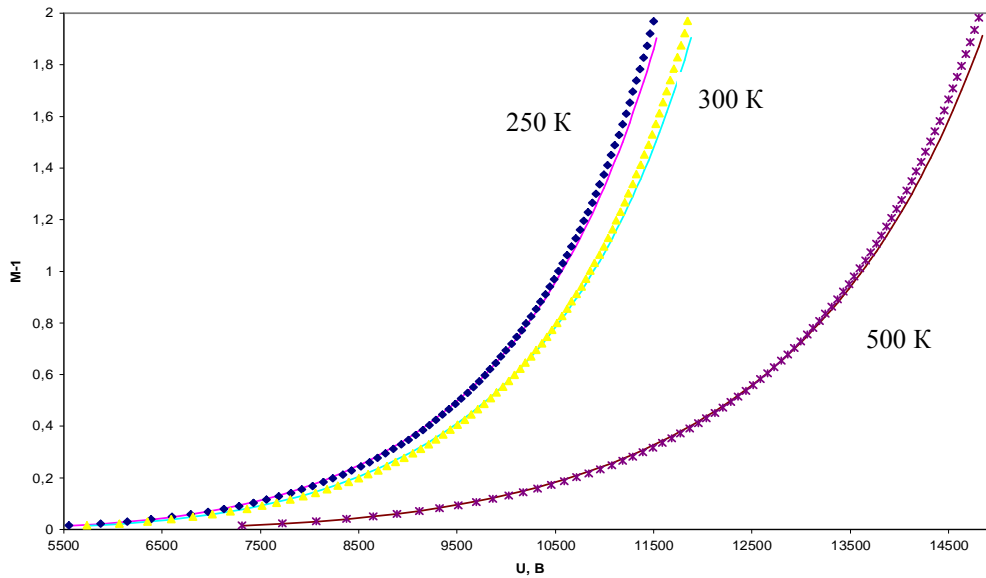


Рисунок 1- Полевая зависимость коэффициентов ударной ионизации при различных температурах.

Используя полевую зависимость коэффициентов ударной ионизации проведен расчет зависимости коэффициентов умножения электронов и дырок от напряжения в резких и плавных переходах с напряжением пробоя от 30 В до 30 кВ в диапазоне температур 250 – 500 К.

Для каждого напряжения пробоя U_b выбирались значения напряжений в диапазоне изменения коэффициентов умножения M_n и M_p от 1,01 до 3, который представляет наибольший интерес при анализе свойств и работы многих полупроводниковых приборов.

На рисунках 2, 3 представлены зависимости коэффициентов умножения электронов и дырок в p^+-n переходе с концентрацией примеси $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при различных температурах.(точками)



2 –Зависимость коэффициентов умножения дырок от напряжения

Рисунок

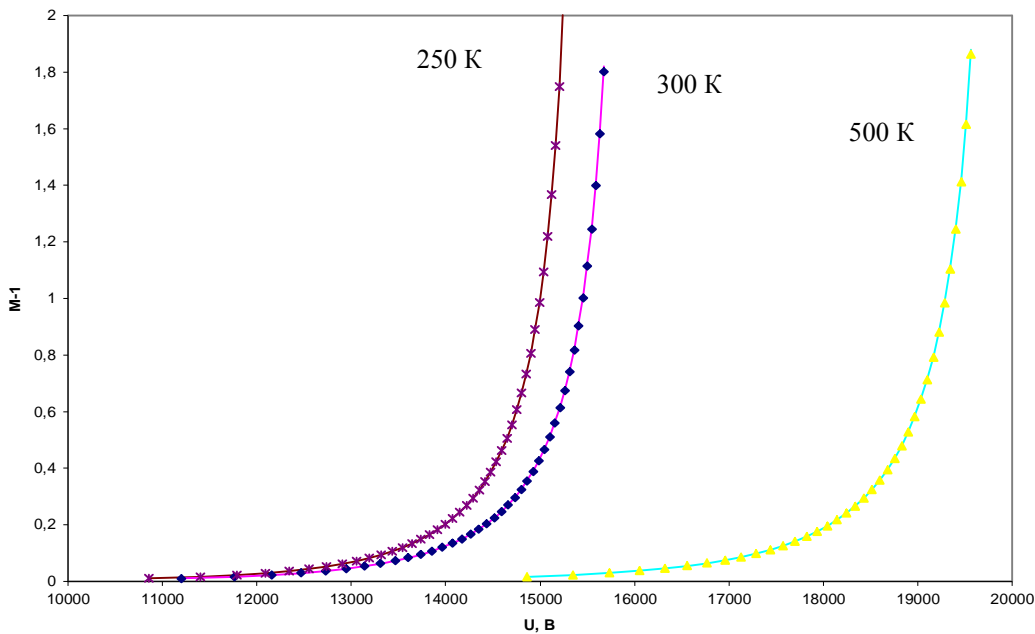


Рисунок 3 –Зависимость коэффициентов умножения электронов от напряжения

Коэффициент умножения носителей заряда в общем случае является функцией приложенного напряжения. Так как эта функция сложная и находится в неявной форме, то она может быть рассчитана лишь численными методами. В то же время для анализа работы и расчёта параметров приборов желательно иметь более простые зависимости коэффициентов умножения от приложенного напряжения.

Первое аппроксимационное выражение такого рода, предложенное Миллером и впоследствии модифицированное Моллом имеет вид

$$M = \left[1 - \left(\frac{1}{f} \frac{U}{U_B} \right)^n \right]^{-1},$$

где U_B - напряжение лавинного пробоя р-п-перехода,

f , n - параметры, зависящие от типа умножаемых носителей заряда, типа р-п-перехода и его напряжения пробоя.

Однако впоследствии выяснилось, что это выражение хорошо описывает зависимости $M(U)$ лишь в редких случаях. Оно, например, плохо пригодно для умножения электронов в кремниевых р-п-переходах. Использовались и другие аппроксимационные выражения но их точность также оказалась недостаточной. При этом все предлагаемые выражения не имели никакого теоретического обоснования.

В работе[2] были предложены и теоретически обоснованы новые аппроксимационные выражения для коэффициентов умножения электронов и дырок в резких и плавных р-п-переходах в виде

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_B} \right)^k \exp \left(-a \left(\frac{U}{U_B} \right)^\chi - 1 \right)}$$

где a и k — параметры аппроксимации

$$\chi = \frac{1}{2} \text{ — для дырок}$$

$$\chi = 4 \text{ — для электронов}$$

Было показано, что для кремниевых р-п-переходов в диапазоне изменения M от 1,01?3 погрешность $(M-1)$ не превышает 1%.

В данной работе исследовались эти зависимости для аппроксимации коэффициентов умножения в р-п-переходах на основе карбида кремния политипа 4Н в диапазоне температур 250-500 К.

При анализе пригодности этого выражения для кремниевых р-п-переходов оказалось, что точность аппроксимации можно улучшить, если наряду с параметрами a и k варьировать параметр χ . Для кремния оказалось, что наиболее оптимальным является $\chi = \frac{1}{2}$ для электронов и $\chi=4$ для дырок как в резких, так и в плавных р-п-переходах. Для карбидкремниевых р-п-переходов также определялось оптимальное, не зависящее от напряжения пробоя, значение χ . Для исследуемого диапазона напряжения наиболее оптимальное значение для карбида кремния политипа 4Н оказалось $\chi=0,75$ для дырок и $\chi=5$ для электронов, как в резких, так и в плавных р-п-переходах

Параметры аппроксимации a и k определялись методом наименьших квадратов, после линеаризации выражения логарифмированием. Это обеспечивало приблизительно одинаковую ошибку аппроксимации для всего диапазона. Для каждого значения температуры и напряжения пробоя использовались расчётные значения $M(U)$. По найденным значениям коэффициентов аппроксимации рассчитывались коэффициенты умножения

На рисунках 2, 3 сплошными линиями приведены соответствующие аппроксимационные зависимости коэффициентов умножения от напряжения.

В таблице 1 в качестве примера представлены результаты аппроксимации зависимости $M_n(U)$ в резком р⁺-п-переходе с концентрацией примеси в базе $N_d=10^{16}$ см⁻³ при $T= 250$ К, 300 К, 500 К.

Таблица 1 – Результаты аппроксимации

$T=250 \text{ K}, U_B=2627 \text{ B}$ $\sigma = 0.039\%$				$T=300 \text{ K}, U_B=2701 \text{ B}$ $\sigma = 0.046\%$				$T=500 \text{ K}, U_B=3326 \text{ B}$ $\sigma = 0.113\%$			
$U, \text{ B}$	$(M-I)_p$	$(M-I)_a$	$\delta, \%$	$U, \text{ B}$	$(M-I)_p$	$(M-I)_a$	$\delta, \%$	$U, \text{ B}$	$(M-I)_p$	$(M-I)_a$	$\delta, \%$
1583	0.0113	0.0114	0.823	1632	0.0113	0.0114	0.847	2054	0.0111	0.0112	0.998
1753	0.0239	0.0239	-0.16	1807	0.0239	0.0239	-0.16	2264	0.0239	0.0239	-0.157
1856	0.0371	0.0370	-0.29	1912	0.0371	0.0371	-0.3	2392	0.0368	0.0367	-0.347
1962	0.0584	0.0583	-0.247	2021	0.0584	0.0583	-0.256	2524	0.0584	0.0582	-0.321
2083	0.0993	0.0992	-0.097	2145	0.0994	0.0993	-0.104	2649	0.0912	0.0911	-0.189
2185	0.1594	0.1594	0.03	2250	0.1597	0.1598	0.0267	2783	0.1515	0.1514	-0.017
2274	0.25	0.25	0.10	2342	0.2510	0.2513	0.104	1913	0.2598	0.2601	0.1194
2336	0.3522	0.3526	0.123	2405	0.3543	0.3547	0.127	2977	0.3508	0.3544	0.163
2419	0.6038	0.6046	0.105	2490	0.6097	0.6104	0.1142	3083	0.6222	0.6233	0.19
2487	1.0543	1.0549	0.054	2554	1.0088	1.0096	0.072	3153	1.0009	1.0027	0.1768
2506	1.2652	1.2656	0.0362	2579	1.2878	1.2884	0.0494	3185	1.2983	1.3004	0.16
2523	1.5375	1.5378	0.01	2597	1.57	1.5705	0.03	3207	1.6062	1.6086	0.15
2540	1.9022	1.9021	-0.003	2614	1.9506	1.9508	0.0118	3221	1.8734	1.8761	0.142

Относительная погрешность (M_n-1) не превышает 1%.

В таблице 2 представлены параметры аппроксимации и относительная среднеквадратичная погрешность δ для (M_n-I) в диапазоне изменения M_n от 1,01 до 3,00 для электронов в резких p^+ - n -переходах при различных температурах

Таблица 4.2

N_d см^{-3}	$T=250 \text{ K}$				$T=300 \text{ K}$				$T=500 \text{ K}$			
	$U_B, \text{ B}$	a	k	$\delta, \%$	$U_B, \text{ B}$	a	k	$\delta, \%$	$U_B, \text{ B}$	a	k	$\delta, \%$
$5 \cdot 10^{14}$	27094	-3.191	1.239	0.55	27916	-3.222	1.235	0.50	34892	-3.464	1.196	0.53
10^{15}	15570	-2.611	1.328	0.66	16036	-2.638	1.326	0.62	19986	-2.882	1.280	0.51
10^{16}	2627	-1.319	1.293	0.04	2701	-1.335	1.296	0.046	3326	-1.459	1.312	0.11
10^{17}	502	-0.552	1.079	0.43	514.9	-0.562	1.083	0.41	623	-0.633	1.113	0.04
10^{18}	116	-0.124	0.808	0.48	118.5	-0.129	0.813	0.45	139.5	-0.168	0.845	0.23
10^{19}	36.6	0.094	0.552	3.19	37	0.091	0.555	3.08	41.7	0.070	0.583	3.09

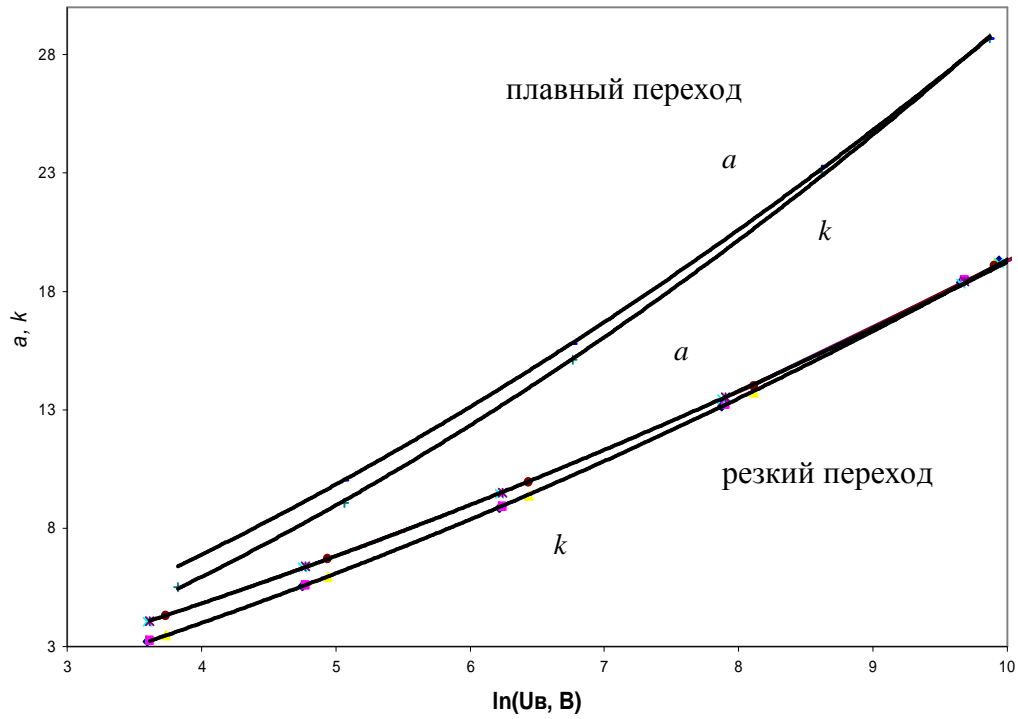
Среднеквадратичная погрешность (M_n-1) составляет 3 %, (M_p-1) 7%

Параметры аппроксимации a и k зависят от напряжения пробоя и от температуры. На рисунках 4, 5 представлены зависимости a и k от $\ln U_B$ для умножения электронов и дырок в резком p^+ - n и плавном переходах для различных температур.

Эти зависимости можно описать полиномом 2 степени

$$a, k = C_0 + C_1 \ln U_B + C_2 (\ln U_B)^2,$$

где C_0, C_1, C_2 - параметры аппроксимации, которые зависят от типа p - n -перехода и типа носителей заряда, но не зависят от температуры.



Рисунок

4- Зависимость параметров a , k от $\ln U_B$ для умножения дырок

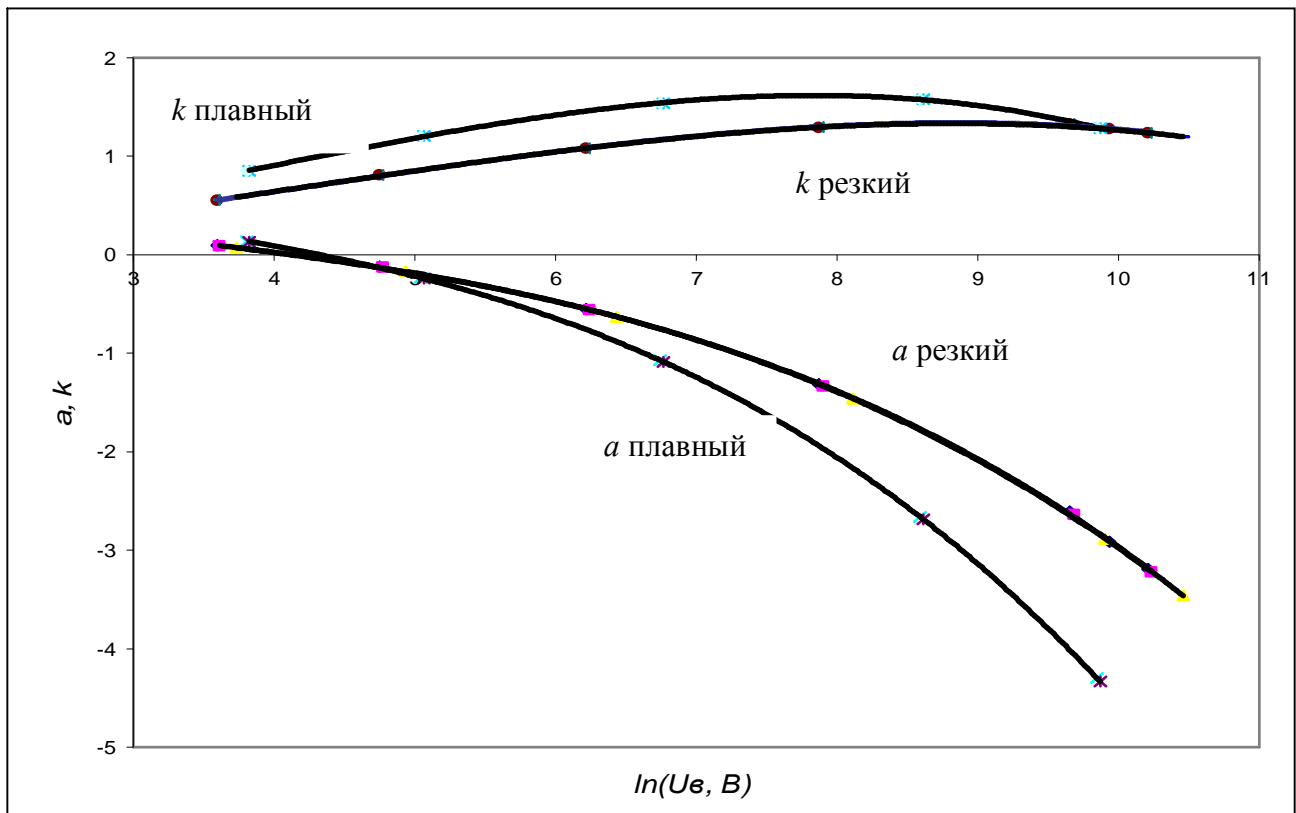


Рисунок 5- Зависимость параметров a , k от $\ln U_B$ для умножения электронов

Литература

1. Ayalew T. SiC Semiconductor Devices Technology, Modeling, and Simulation/ T. Ayalew// American Institute of Physics, 2003
2. Серезкин, Ю.Н. Умножение носителей заряда в кремниевых р-п переходах / Ю.Н. Серезкин, А.А.Шестеркина // ФТП. – 2003. – т.37. – вып.9. – С.1109–1112.