

بررسی علل ناپایداری ماشینکاری کاربید سیلیسیم به روش تخلیه الکتریکی^۱

رمضانعلی مهدوی نژاد

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

امیر عبدالله

استادیار بخش مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۷۸/۲/۱۲، تاریخ تصویب ۷۹/۱۰/۲۴)

چکیده

کاربید سیلیسیم از جمله مواد سرامیکی است که در صنایع مدرن به سرعت جایگزین مواد فلزی می‌شود. لذا ماشینکاری آن ضرورت بیشتری پیدا کرده است. و مقاومت سایشی بالای این ماده باعث شده که از میان روشهای مختلف ماشینکاری سنتی، تنها روش سنگ‌زنی آنهم به وسیله چرخهای سمباده مخصوص گرانیقیمت و با وجود محدودیت در انتخاب پارامترهای ماشینکاری (انتخاب شکلهای ساده قطعه کار و سرعت براده برداری پایین) میسر باشد. در میان روشهای غیر سنتی ماشینکاری، روش EDM یکی از مهمترین آنها و شاید تنها روش ماشینکاری این ماده است. با وجود این به علت وقوع پدیده‌ای موسوم به آرک، به هنگام ماشینکاری ناپایداری در فرآیند بوجود می‌آید و ضمن نفوذ کربن در قطعه کار و تأثیر شدید بر کیفیت بافت سطحی، سرعت باربرداری کاهش می‌یابد. این آزمایش نشان می‌دهد که در زمان‌های مختلف روشنی پالس و در شرایط تغییر تعداد ترانزیستور در مدار درصد جرقه‌های آرک با حدود ۶۰٪ بیشترین درصد پالسها و درصد پالسهای مدار باز با کمتر از ۲۰٪ کمترین درصد پالسها می‌باشد در حالیکه درصد جرقه‌های عادی کم و نزدیک به درصد پالسهای مدار باز است. تصاویر SEM از سطح ماشینکاری شده، وجود سیلیکون خالص را نشان می‌دهد که به دلیل مقاوم بودن سیلیکون در مقابل جریان الکتریسیته می‌تواند یکی از عوامل ناپایداری فرآیند باشد. از طرف دیگر حرارت ایجاد شده در بدنه کاربید سیلیسیم به ویژه در نزدیکی سطح ماشینکاری شده می‌تواند باعث پیدایش لایه نازک بخار در سطح شود که این پدیده به نوبه خود می‌تواند سبب تشکیل کانال پلاسما گشاد که دارای رشد سریع می‌باشد گردد. در نتیجه وقوع این پدیده جرقه‌های آرکی ایجاد می‌شود.

این مقاله ضمن بررسی علل ناپایداری ماشینکاری کاربید سیلیسیم به روش EDM، راه‌حلهایی جهت حذف، و یا تعدیل آنها ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تولید سیلیکون کارباید، ماشینکاری سیلیکون کارباید، ناپایداری در EDM

مقدمه

عنوان ماده ساینده گسترش داده است [۱]. کاربید سیلیسیم در سال ۱۸۹۲ و برای اولین بار توسط اچسن^۲ به روش صنعتی تهیه شد. نوع خاصی از این ماده که به اختصار REFEL SiC^۳ نامیده میشود، با توجه به فرآیند تولید، دارای هدایت حرارتی بهتری است و کاربرد بیشتری دارد و لذا ماشینکاری این نوع بیشتر مدنظر است. کاربید سیلیسیم دارای دو فاز α, β است که فاز α در دمای پایین مکعبی است و در بالاتر از 2000°C به فاز β که هگزاگونال است، تبدیل میشود. در 2700°C ذوب و در 2830°C تجزیه می‌گردد [۲]. برای تهیه SiC REFEL، مخلوطی از α -SiC و گرافیت

کاربید سیلیسیم چهارمین ماده سخت جهان پس از الماس، برن نایتراید و برن کار باید است. این ماده جزء سرامیکهای غیراکسیدی است و با توجه به ویژگیهای این نوع مواد بطور عام و کاربید سیلیسیم بطور خاص، کاربرد آنها در صنایع بصورت روز افزون افزایش یافته است. ظرفیت حرارتی، سختی و ضریب هدایت حرارتی بالا، ضریب انبساط حرارتی و هدایت الکتریکی پایین و مقاومت شدید در برابر شوک حرارتی (جدول ۱)، از ویژگیهایی است که کاربرد آنها در کوره‌ها به عنوان المان حرارتی، در نیروگاههای اتمی به عنوان حفاظ و تعدیل کننده نوترونها و در ماشینکاری به

جدول ۱: مقایسه خواص REFEL SIC با تعدادی از مواد [۳].

Material	Density g/cm ³	Hardness H.V	Young's Modulus(E) GN/m	Therm. Expan. 1.0E-6/°C	Thermal Conductivity(K) at 100°C (W/mc at 1200°C)	Spec. Heat J/g.°C	Elec. Res. (ohm.cm)	Therm. shock (Cal/cm.sec) at 500°C
Refel Sic	3.10	2500	413	4.30	83.6	38.9	670-710 0.52(at 25°C) 0.016(at 1200°C)	59
Hot Pressed Silicon- Nitride	3.20	2500-3500	310	3.20	17.5	14	—	29
Hot Pressed Alumina	3.90	2500	365	9.0	8.4	5	—	3
Reaction bon- ded Silicon Nitride	2.60	900-1000	220	3.2	15	14.2	—	13
Tungsten Car- bide(6% co)	15.0	1500	606	4.9	86	—	205	20E-5
Steel	7.86	800	206	12.2(at 100°C) 13.4(at 1000°C)	51.9(at 0°C)	29.7	418	1.0E-5

شده که در اثر ایجاد حرارت موضعی و سوختن باندهای رزینی و فلزی، تنها باند Vitrified تا حدودی موفق بوده است [۴]. از میان ماشینکاریهای غیر سنتی، روش الکتروشیمیایی^۶ به خاطر ایجاد یک لایه بسیار مقاوم اکسیدی روی قطعه کار ناموفق می‌باشد. روش ماشینکاری شعاع الکترونی^۷ مناسب نیست زیرا باعث پودر شدن موضع ماشینکاری می‌شود [۵]. روش EDM بهترین روش ماشینکاری کاربرد سیلیسیم است. ماشینکاری کاربرد سیلیسیم به روش EDM برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ توسط گرین و سپس در سال ۱۹۸۱ به وسیله اجمل در یومیست انجام شد که هدف اصلی آن بهینه کردن پارامترهای ماشینکاری بوده و هیچگونه تحلیلی در خصوص علل ناپایداری فرآیند ماشینکاری ارائه نشده است [۹ و ۱۰]. در این روش نوین ماشینکاری، رفتار این ماده نیمه هادی متفاوت با مواد هادی است و غالباً جرقه‌های آرک به وقوع می‌پیوندد. هدف مقاله حاضر بررسی علل وقوع پدیده ناپایداری فرآیند ماشینکاری کاربرد سیلیسیم به روش EDM می‌باشد.

روش آزمایش

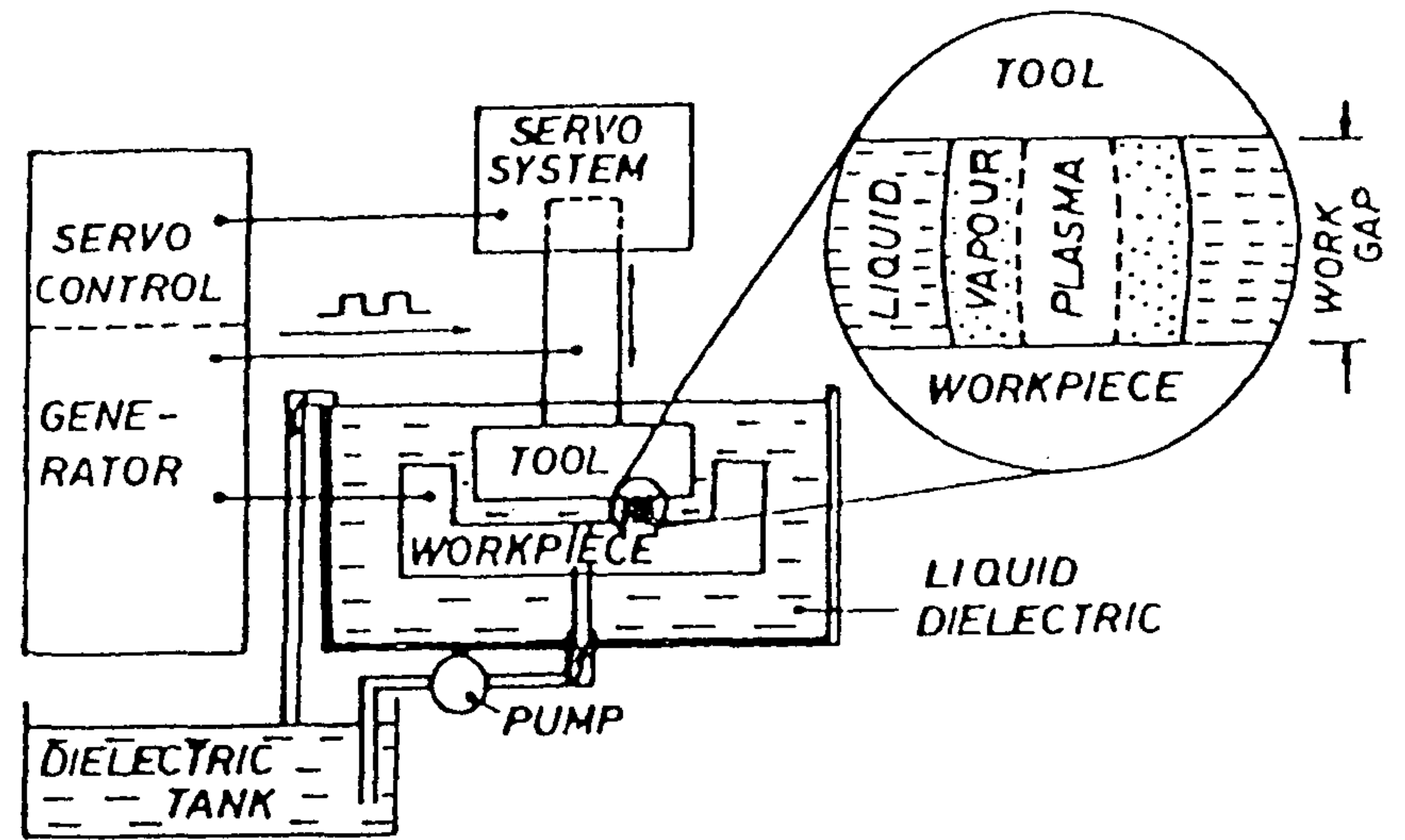
EDM یک روش ماشینکاری غیرسنتی است که در آن بین دو قطعه به نامهای ابزار و قطعه کار که در فاصله بسیار نزدیکی از هم قرار دارند و فضای بین آنها را مایع عایق پر کرده است. در نزدیکترین

را به یکی از روشهای معمول شکل داده و در کوره خلاء و در مجاورت بخار سیلیسیم سینتزمی‌کنند. در اثر نفوذ بخار سیلیسیم به بدنه و ترکیب آن با کربن، فاز β -SiC تشکیل می‌شود که دانه‌های α -SiC را مهار می‌کند [۳]. ماشینکاری کاربرد سیلیسیم توسط روشهای سنتی با توجه به سختی بالای آن بسیار مشکل است [۴]. آزمایشهای متعدد در مرکز اتمی انگلیس^۴ نشان می‌دهد که ماشینکاری سنتی کاربرد سیلیسیم با توجه به سختی و طبیعت فرساینده آن هزینه بسیار بالایی دارد. نظر به سختی زیاد و مقاومت فرسایشی بالای کاربرد سیلیسیم، بدواً چنین تصور می‌شد که الماس تنها ماده‌ای است که می‌تواند آن را ماشینکاری نماید. لذا ابزارهای الماسه در این راستا توسعه یافت. تجربه نشان داده است که ماشینکاری کاربرد سیلیسیم به روشهای سنتی عموماً ناموفق بوده است. مطالعات انجام شده در مرکز تحقیقات سوخت اتمی انگلیس^۵ جهت ماشینکاری کاربرد سیلیسیم نشان می‌دهد که ماشینکاری این ماده توسط ماشین گرد تراش با استفاده از ابزار تنگستن مقدور نبوده و با ابزار الماسه نیز ناموفق بوده است. در این روش تنها ماشینکاری کاربرد سیلیسیم تف جوشی نشده امکان پذیر است و چنان که عمق برش زیاد شود به ایجاد پدیده ترک سطحی می‌انجامد [۴]. ماشینکاری این ماده به روش سنگ‌زنی و با استفاده از سنگ سمباده استاندارد الماس با باند رزینی، فلزی و Vitrified انجام

عبارتند از:

۱- مواد

الف - قطعه کار: شامل سه قطعه کاربرد سیلیسیم به ابعاد $43 \times 22 \times 8 \text{ mm}$ ، $115 \times 20 \times 9 \text{ mm}$ و $100 \times 25 \times 8 \text{ mm}$ که بعد از ماشینکاری به منظور انجام آزمایشهای سطحی توسط میکروسکوپ الکترونی، به وسیله دیسک الماس برش خورده‌اند.
 ب- ابزار: مفتولهای مسی به قطر 10 mm و طول 55 mm که برش خورده و کف تراشی شده‌اند. علت انتخاب الکتروود مس به عنوان ابزار هدایت بالا، ارزانی و فراوانی آن بوده است.

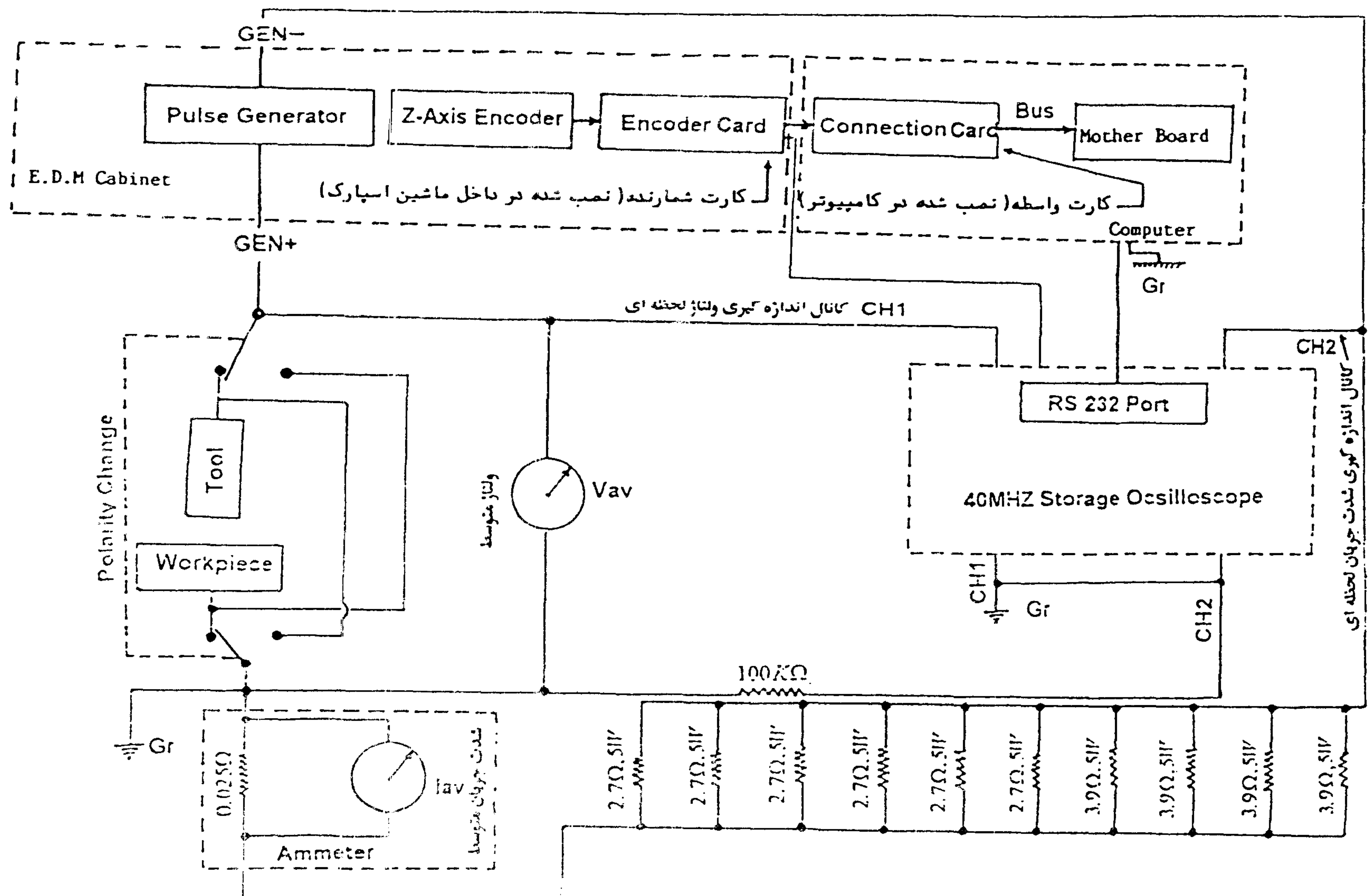


شکل ۱: شمای کلی ماشینکاری به روش E.D.M [۶].

۲- وسایل مورد استفاده در آزمایشها

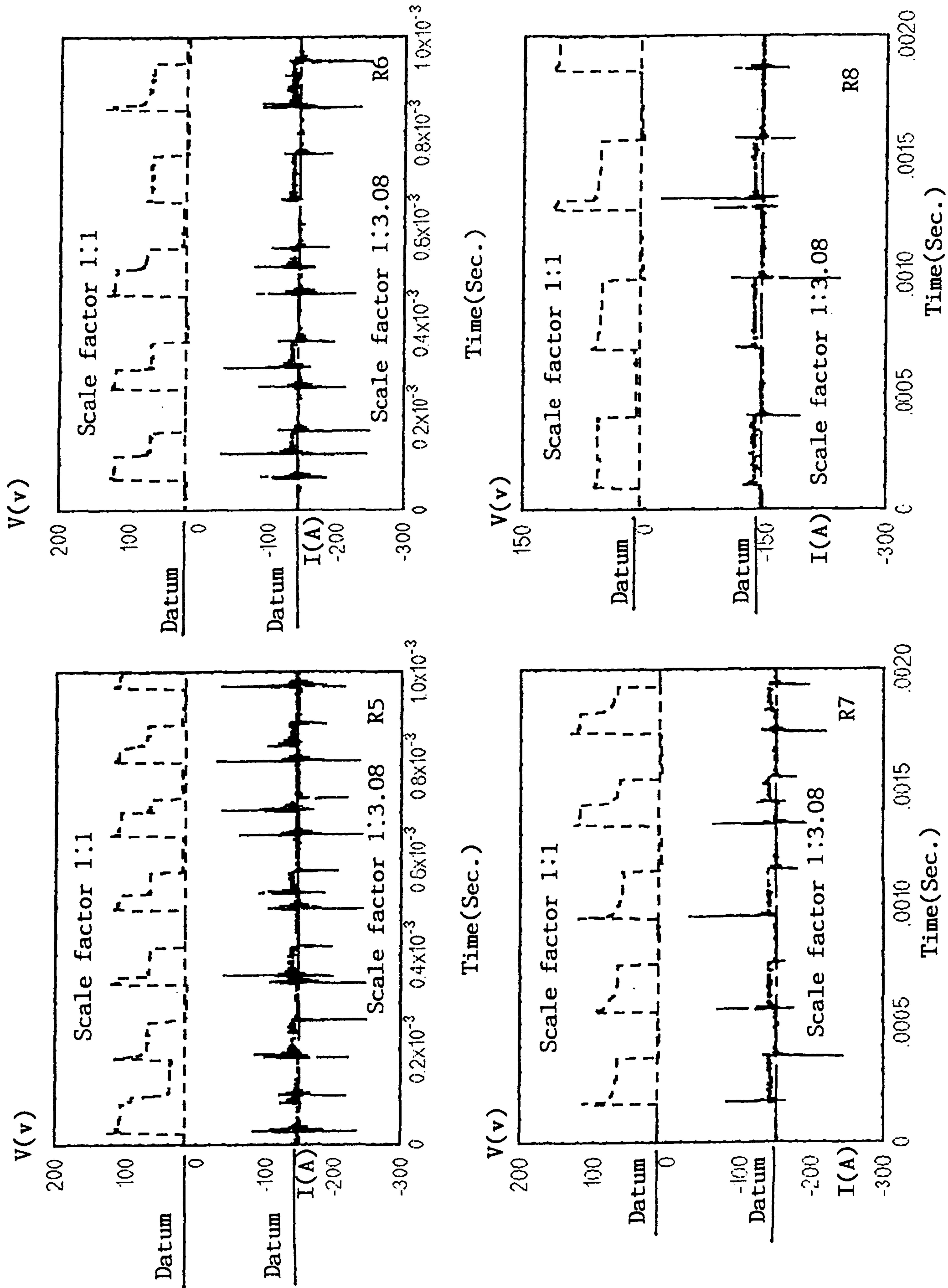
- ماشین اسپارک: Deckel-CNC، مدل DE ۲۰ مجهز به سیستم آیزوفرکانس با ولتاژهای مدار باز اسمی $120/150/180 \text{ V}$ ، سیستم کنترل گپ ماشینکاری و سیستم جلوگیری از آرک واتصال کوتاه. این سیستم قادر است زمان روشنی پالس $1-3000 \mu\text{s}$ ، زمان

برجستگیهای زبری توسط ولتاژ منقطع جرقه‌های منقطع ایجاد می‌شود (شکل ۱) و در هر جرقه قسمت کوچکی از سطح قطعه کارکنده شده و در نهایت مادگی شکل پیشانی ابزار در قطعه کار به وجود می‌آید [۶]. مواد و وسایل مورد استفاده در آزمایش



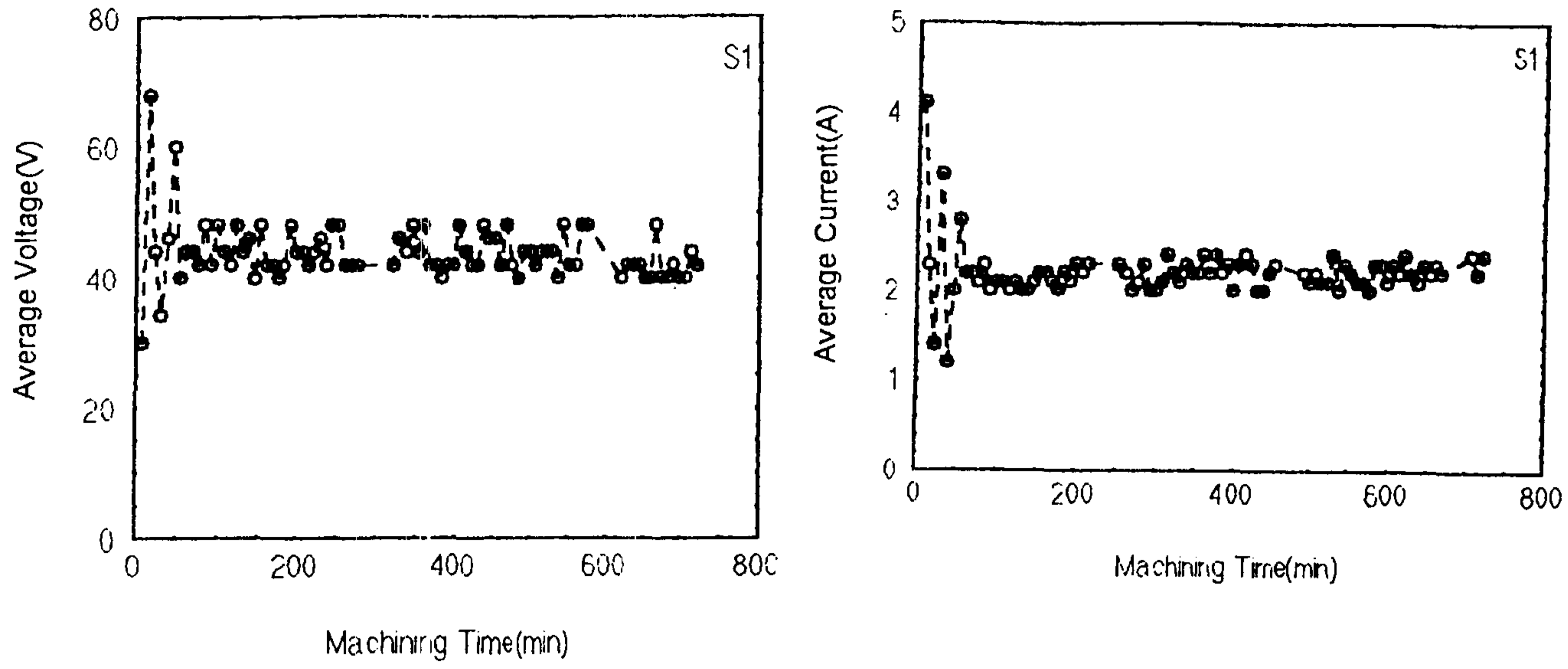
شکل ۲: شمای کلی نحوه ارتباط و اتصال دستگاهها و لوازم مورد استفاده در آزمایشها.

Workpiece Material: REFEL SiC	R5: 80 Micro.Sec
Tool Electrode: Cu	R6: 100 Micro.Sec
Electrode Polarity: Positive	R7: 200 Micro.Sec
Dielectric: Paraffin	R8: 300 Micro.Sec
No. Of Transistors: 4	
Open Circuit Voltage: 180V	
Pulse Time=Pause Time:	

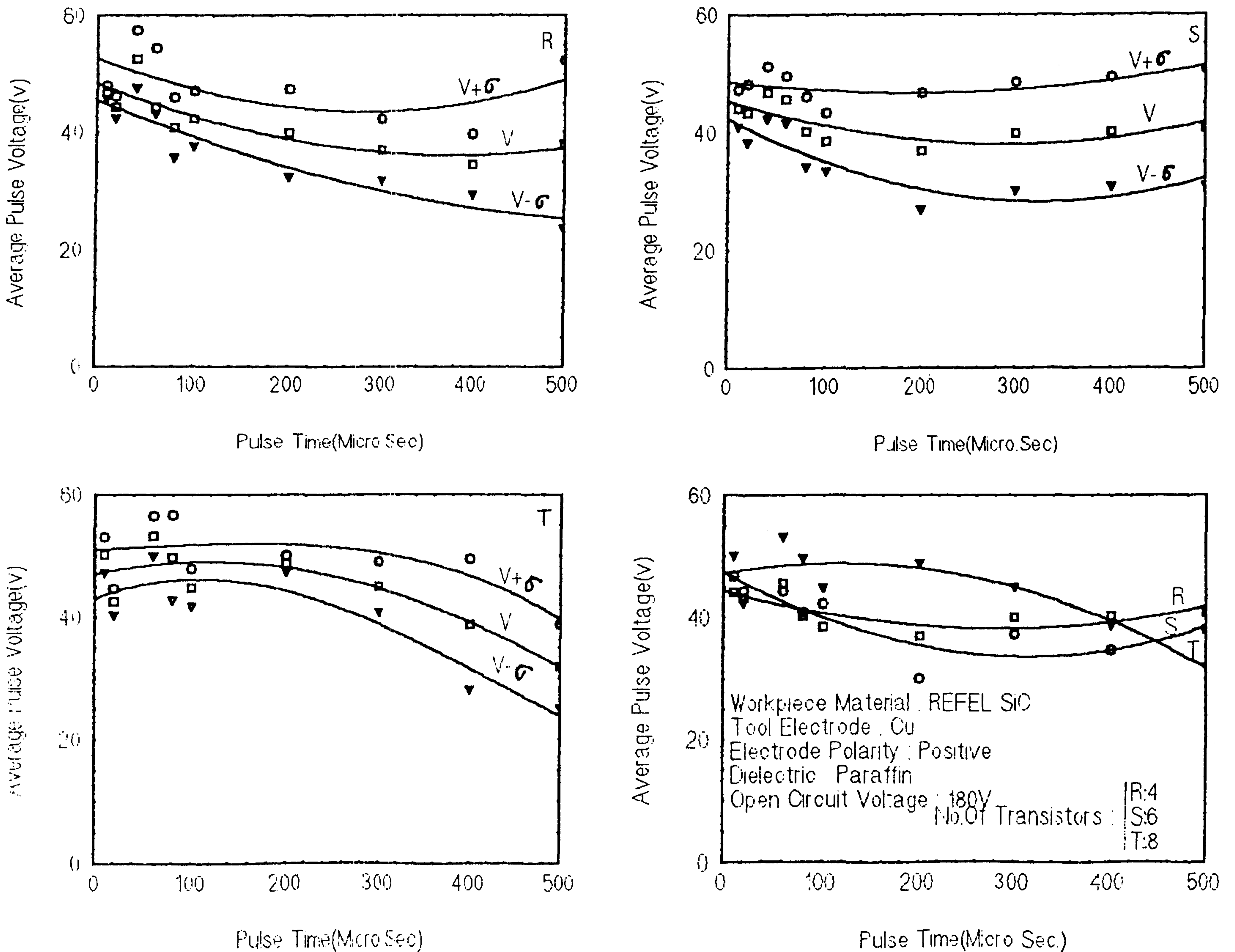


شکل ۳: نمونه منحنی تغییرات ولتاژ و شدت جریان لحظه‌ای برحسب زمان برای سیلیکون کارباید با چهار ترانزیستور در مدار و برای چهار زمان روشنی پالس مختلف.

Workpiece Material: REFEL SiC
 Tool Electrode: Cu
 Electrode Polarity: Positive
 Dielectric: Paraffin
 No. Of Transistors: 6
 Open Circuit Voltage: 180V
 Pulse Time=Pause Time: 10 Micro.Sec



شکل ۴: منحنی تغییرات ولتاژ و شدت جریان متوسط لحظه‌ای بر حسب زمان ماشینکاری برای سیلیکون کارباید با شش ترانزیستور در مدار.



شکل ۵: منحنی تغییرات ولتاژ متوسط بر حسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری سیلیکون کارباید با سه جریان مختلف.

نتایج آزمایش و بحث بر روی آنها

الف - اندازه گیری ولتاژ متوسط و شدت جریان متوسط لحظه‌ای بین دو الکترود.

ولتاژ متوسط لحظه‌ای بین ابزار و قطعه کار و شدت جریان متوسط لحظه‌ای از روی مولتی مترهای مربوطه به دفعات قرائت و ثبت شده‌اند و در نهایت منحنی آنها برحسب زمان بصورت جداگانه رسم شده است (برای نمونه شکل ۳).

ب - رسم منحنیهای ولتاژ متوسط و شدت جریان متوسط هر آزمایش نسبت به زمان روشنی پالس:

از آنجا که بعضی از نقاط منحنیهای ولتاژ متوسط و شدت جریان متوسط لحظه‌ای نسبت به زمان پراکندگی زیادی دارند متوسط گیری برای هر آزمایش از نتایجی صورت پذیرفته است که در محدوده $\pm 3\sigma$ قرار دارند:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (1)$$

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$V_{av} = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} V_i}{m_1} \quad (3)$$

$$I_{av} = \frac{\sum_{j=1}^{m_2} I_j}{m_2} \quad (4)$$

که در آن m_1 و m_2 به ترتیب نقاط باقیمانده از ولتاژ و شدت جریان متوسط لحظه‌ای پس از حذف نقاط خارج از $\pm 3\sigma$ است. پارامترهای \bar{x} ، σ ، V_{av} و I_{av} به ترتیب مقدار اندازه گیری شده، متوسط مقادیر اندازه گیری شده، ولتاژ متوسط و شدت جریان متوسط می‌باشند.

شکل‌های (۵) و (۶) منحنیهای ولتاژ متوسط و شدت جریان متوسط و نیز منحنیهای پراکندگی حول متوسط را نسبت به زمان روشنی پالس نشان می‌دهند.

ج - رسم منحنیهای سرعت باربرداری و فرسایش نسبی ابزار بر حسب زمان روشنی پالس:

با توزین جرم قطعه کار قبل و بعد از هر آزمایش، میزان جرم برداشته شده (Δm) بدست آمده که از تقسیم نمودن آن بر مقدار چگالی کاربرد سیالیسیم حجم مربوطه محاسبه شده و از تقسیم این

خاموش پالس $1-500 \mu s$ و شدت جریان جرقه $3/5-45A$ را در سیزده وضعیت انتخاب جریان تولید نماید [۷].

- اسلیسکوپ حافظه دار $40 MHz$ دو کاناله، مارک Hung chang 5804 ، دارای قلمرو $400v$ و کوچکترین قسمت بندی $5mv/Div-5v/Div$.

- مولتی متر عقربه‌ای - دیجیتالی، مارک Hung chang، دارای قلمرو $1000v-200mv$ و کوچکترین قسمت بندی $10\mu v-1v$ برای اندازه گیری ولتاژ متوسط بین ابزار و قطعه کار.

- مولتی متر عقربه‌ای، مارک Tandy، مدل Micronta، دارای قلمرو $10A$ و کوچکترین قسمت بندی $5\mu A$ برای اندازه گیری شدت جریان متوسط ماشینکاری.

مطابق شکل (۲) ماشین اسپارک و تجهیزات اندازه گیری لحظه‌ای پارامترهای ماشینکاری بهم متصل شده‌اند. مقاومت معادل شانت اندازه گیری شدت جریان لحظه‌ای $0/333\Omega$ می‌باشد.

- ترازوی دیجیتالی، مدل Kern $S2000$ ، با قلمرو $200gr-0/0001gr$ و کوچکترین قسمت بندی $0/0001gr$.

- میکروسکوپ الکترونی SEM، مدل Cambridge با بزرگنمایی $X300000$.

- کروномتر

شرایط آزمایشها

- مایع عایق: نفت سفید با 15% روغن ترانس

- پلاریته ابزار: مثبت

- ولتاژ مدارباز اسمی: $180V$

- ولتاژ مدارباز واقعی: $216V$

- تعداد ترانزیستور در مدار (شدت جریان تنظیمی): 4 ، 6 و 8 عدد - زمان روشنی و خاموشی پالس:

$T_i = T_0 = 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 300, 400, 500 \mu s$

چون مکانیزم براده برداری مکانیکی نیست از فیکسچر خاصی استفاده نشده و قطعه کار از دو طرف به میز وان دستگاه کلمپ شده است. دمای مایع عایق و نیز تمیز بودن آن در پایداری فرآیند ماشینکاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا دمای آن در $20^\circ C$ ثابت شده و برای حذف آلودگیها در ابتدای هر آزمایش مایع عایق به مدت پانزده دقیقه توسط پمپ جریان داشته و فیلتره شده است. در خاتمه هر آزمایش ابزار و قطعه کار و نیز وان مایع توسط الکل کاملاً تمیز شده‌اند.

پستی و بلندی‌های سطوح حذف و سطح دو الکتروود موازی می‌شوند، ماشینکاری به حالت پایا نزدیکتر شده و می‌توان تعداد ترانزیستور در مدار را به تعداد موردنظر رساند. در نتیجه ادامه ماشینکاری با پایداری بیشتر و افزایش درصد جرقه‌های عادی همراه خواهد بود. پس از این مرحله، یکی از علل مهم ناپایداری احتمالاً تجمع آلودگیها در سطح‌های الکتروود و قطعه کار به خاطر ضعف شستشو در این ناحیه می‌باشد.

شکل (۳) نمونه‌ای از پالسهای ولتاژ و شدت جریان اخذ شده توسط اسلیسکوپ در زمانهای مختلف روشنی پالس رانشان میدهد. این پالس‌ها برای هر آزمایش در کامپیوتر ذخیره شده‌اند.

در شکل‌های (۵) و (۶) واگرایی نوسانات ولتاژ و شدت جریان متوسط در اثر افزایش زمان روشنی پالس و تغییر در تعداد ترانزیستورها ملاحظه می‌شود. تغییرات ولتاژ نسبت به افزایش زمان پالس غالباً روند نزولی و تغییرات شدت جریان نسبت به زمان روشنی پالس غالباً روند صعودی دارد. افزایش تعداد ترانزیستور غالباً باعث افزایش واگرایی میشود.

اختلاف در تغییرات ولتاژ متوسط زمانی که تعداد ترانزیستورها تغییر می‌کند چندان زیاد نمی‌باشد. همچنین افزایش تعداد ترانزیستور بر شدت جریان متوسط اثر چندانی نمی‌گذارد.

با افزایش زمان روشنی پالس، سرعت باربرداری تا حدود $T_j = 50-100 \mu s$ به سرعت افزایش یافته و سپس با اندکی کاهش مجدداً در زمانهای روشنی پالس بالاتر، با شیب کمتری افزایش می‌یابد (شکل ۷). تعداد ترانزیستور بر سرعت باربرداری اثر چندانی ندارد.

فرسایش نسبی ابزار برحسب زمان روشنی پالس بطور کلی دارای یک روند نزولی می‌باشد و تابع تعداد ترانزیستور در مدار (شدت جریان تنظیمی) نمی‌باشد (شکل ۸).

در شکل (۹) درصد انواع مختلف پالسها برحسب زمان روشنی پالس در سه جریان مختلف نشان داده شده است. این شکل نشان میدهد که میزان جرقه‌های آرک در تعداد ترانزیستورهای مختلف در مدار بالاترین درصد بوده (حدود ۶۰٪) و درصد پالسهای مدار باز کمترین است (کمتر از ۲۰٪). درصد پالسهای عادی کم و نزدیک به درصد پالسهای شبه آرک و مدار باز است. درصد پالسهای آرک با افزایش زمان روشنی پالس عمدتاً افزایش ناچیزی دارد و درصد پالسهای مدار باز با افزایش زمان روشنی پالس کاهش ناچیزی را نشان می‌دهد. درصد پالسهای عادی و شبه آرک با افزایش زمان روشنی پالس تقریباً ثابت است. شکل (۱۰) همچنین نشان میدهد

حجم بر زمان ماشینکاری، سرعت باربرداری در هر آزمایش بدست می‌آید (شکل ۷).

باتوزین ابزار قبل و بعد از ماشینکاری و محاسبه تغییر حجم آن و سپس تقسیم آن بر تغییر حجم قطعه کار می‌توان فرسایش نسبی ابزار را بدست آورد (شکل ۸).

د- استخراج درصد ولتاژ مدار باز، جرقه عادی، جرقه غیرعادی آرک و نزدیک به آرک و رسم منحنیهای آنها:

در پالس مدار باز ولتاژ در طول زمان پالس بالاست و شدت جریان صفر است و در جرقه عادی زمان تأخیر جرقه طولانی وجود دارد. در حالت وقوع جرقه شبه آرک زمان تأخیر جرقه نزدیک به صفر است. و در جرقه غیرعادی آرک زمان تأخیر جرقه صفر است.

باتوجه به منحنیهای اخذ شده ولتاژ و شدت جریان لحظه‌ای توسط اسلیسکوپ (نمونه شکل ۸) و ذخیره آنها در حافظه کامپیوتر و سپس آنالیز چشمی آنها، درصد هریک از پالسهای چهارگانه در یک آزمایش مشخص شده و منحنی مربوط به تغییرات درصد این پالسها برحسب زمان روشنی پالس رسم شده است (شکل‌های ۹ و ۱۰).

اگر در یک آزمایش n صفحه تصویر از اسلیسکوپ ضبط و در هر صفحه تصویر m پرپود وجود داشته باشد جمعاً $m \times n$ پرپود ضبط شده است. حال اگر تعداد جرقه‌های عادی، آرک، نزدیک به آرک و پالسهای مدار باز به ترتیب a, b, c, d باشند نتیجه میشود:

$$\text{درصد جرقه عادی} = \frac{a}{m \times n} \times 100$$

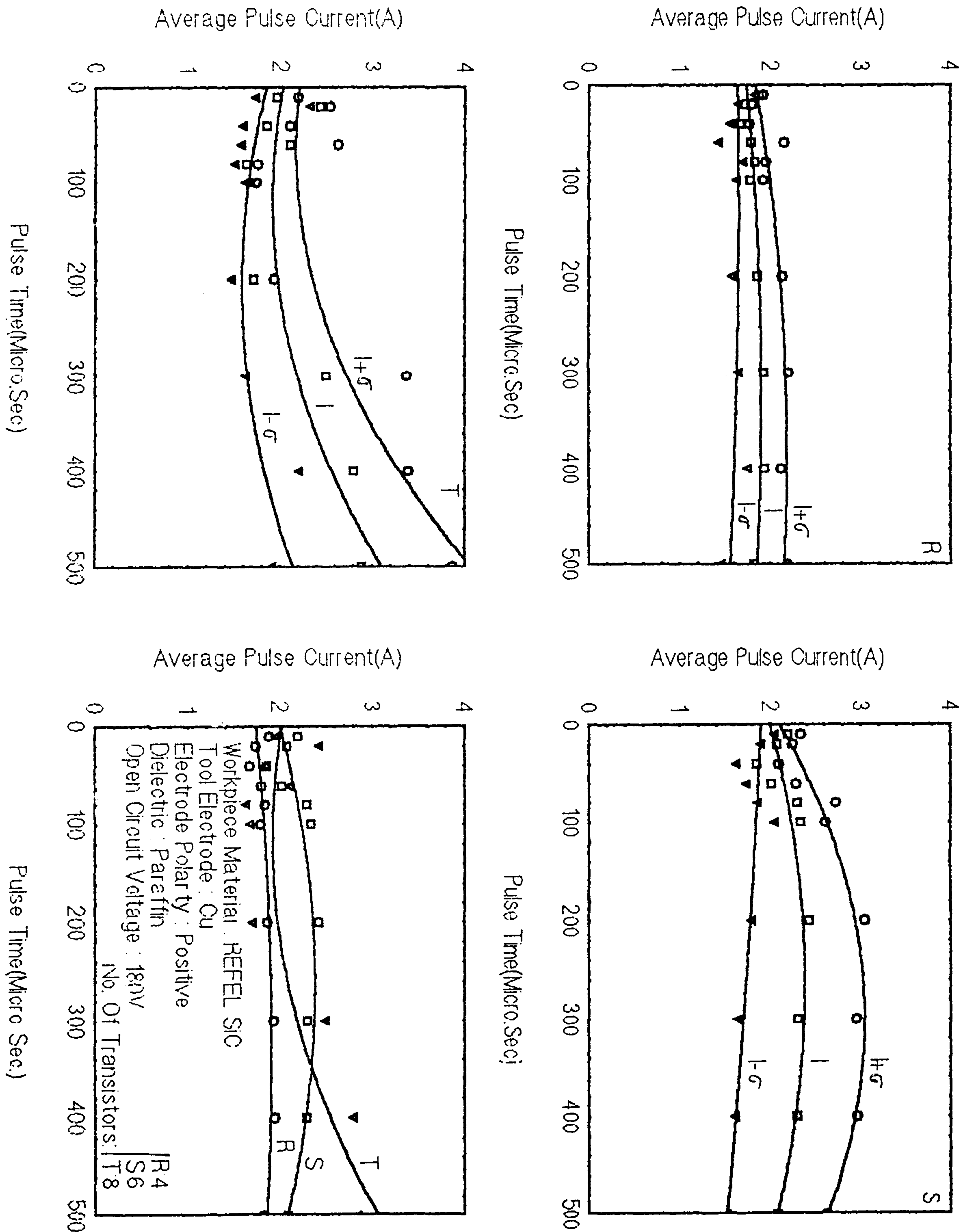
$$\text{درصد جرقه آرک} = \frac{b}{m \times n} \times 100$$

$$\text{درصد جرقه نزدیک به آرک} = \frac{c}{m \times n} \times 100$$

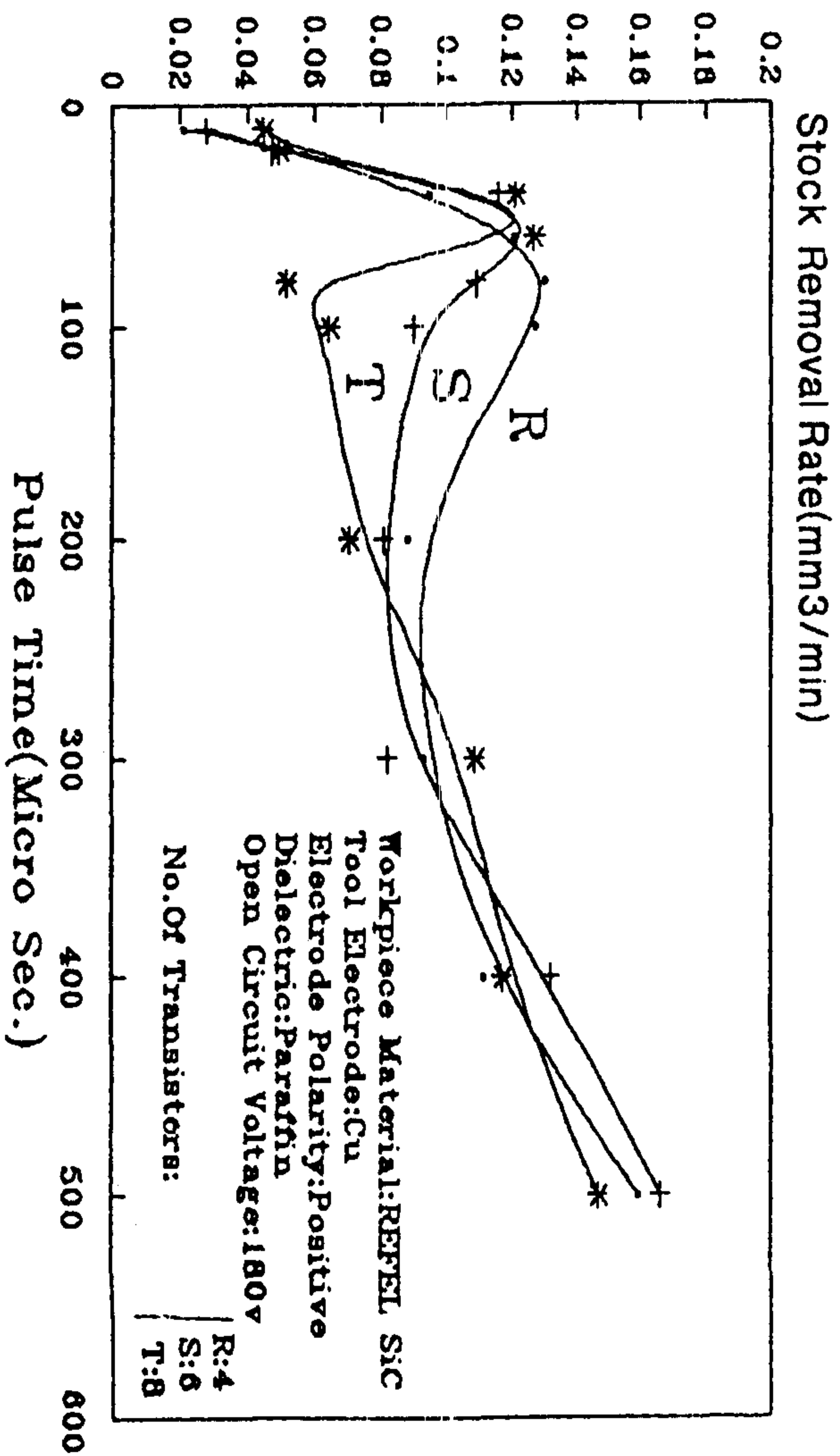
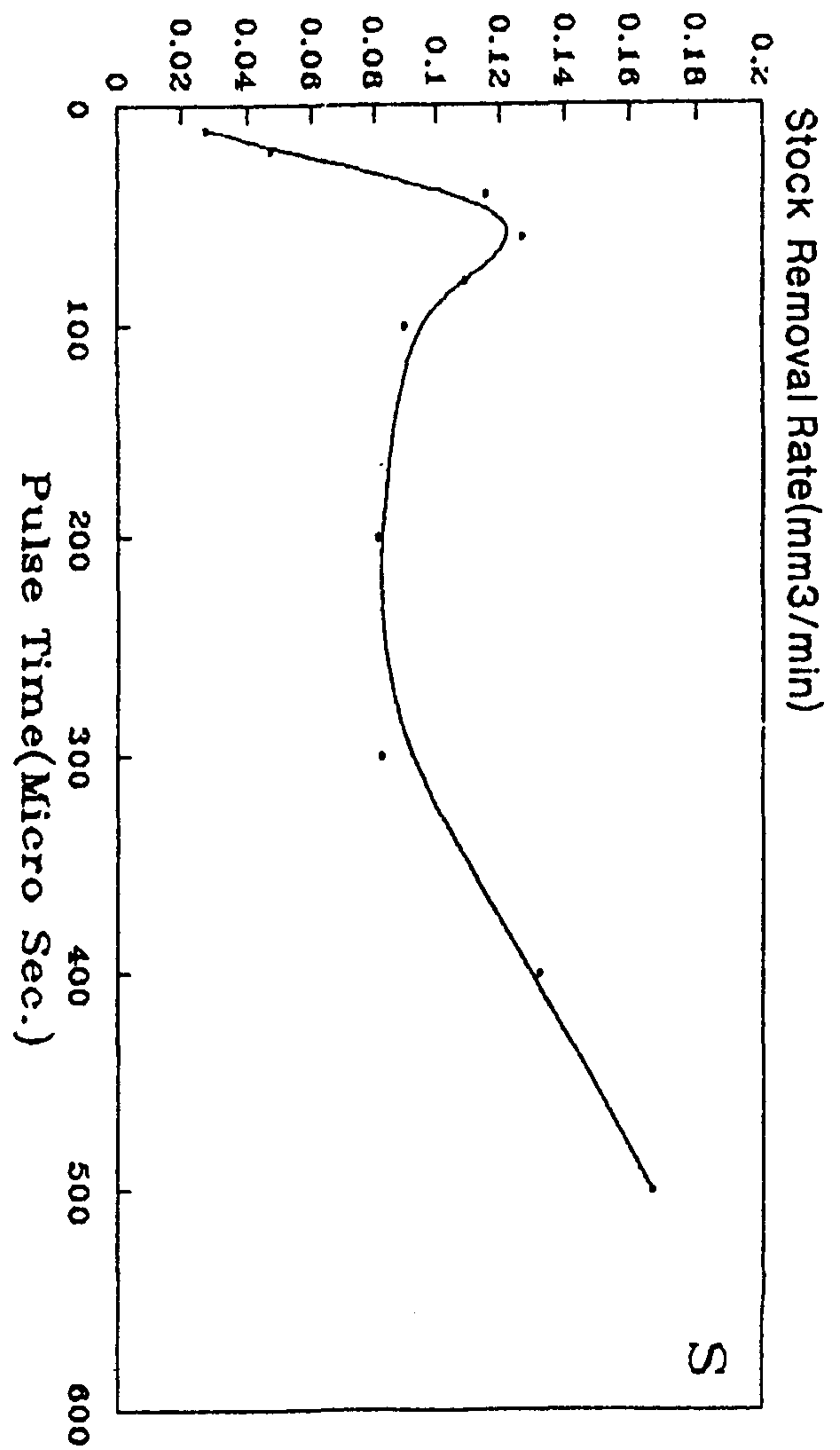
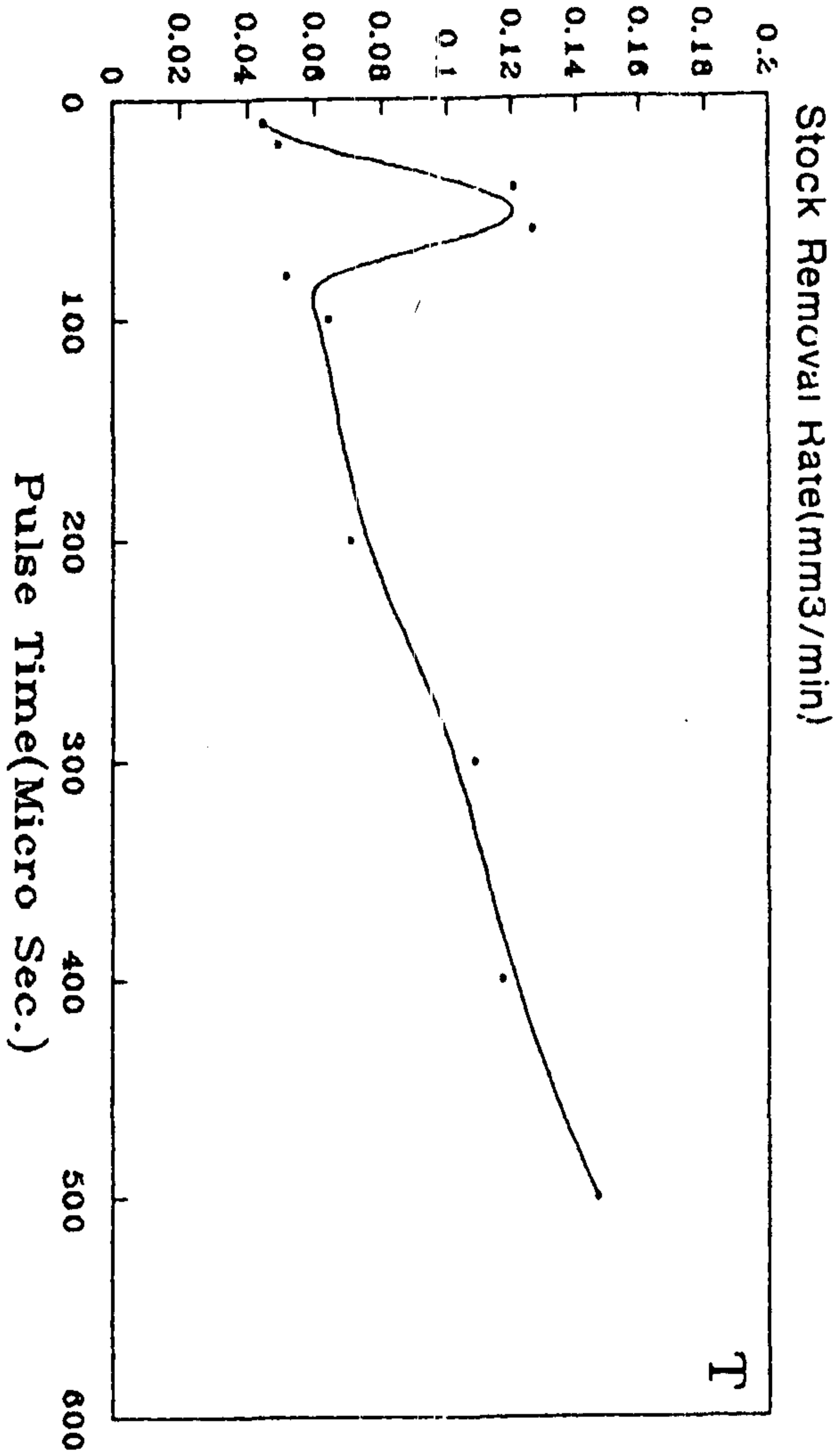
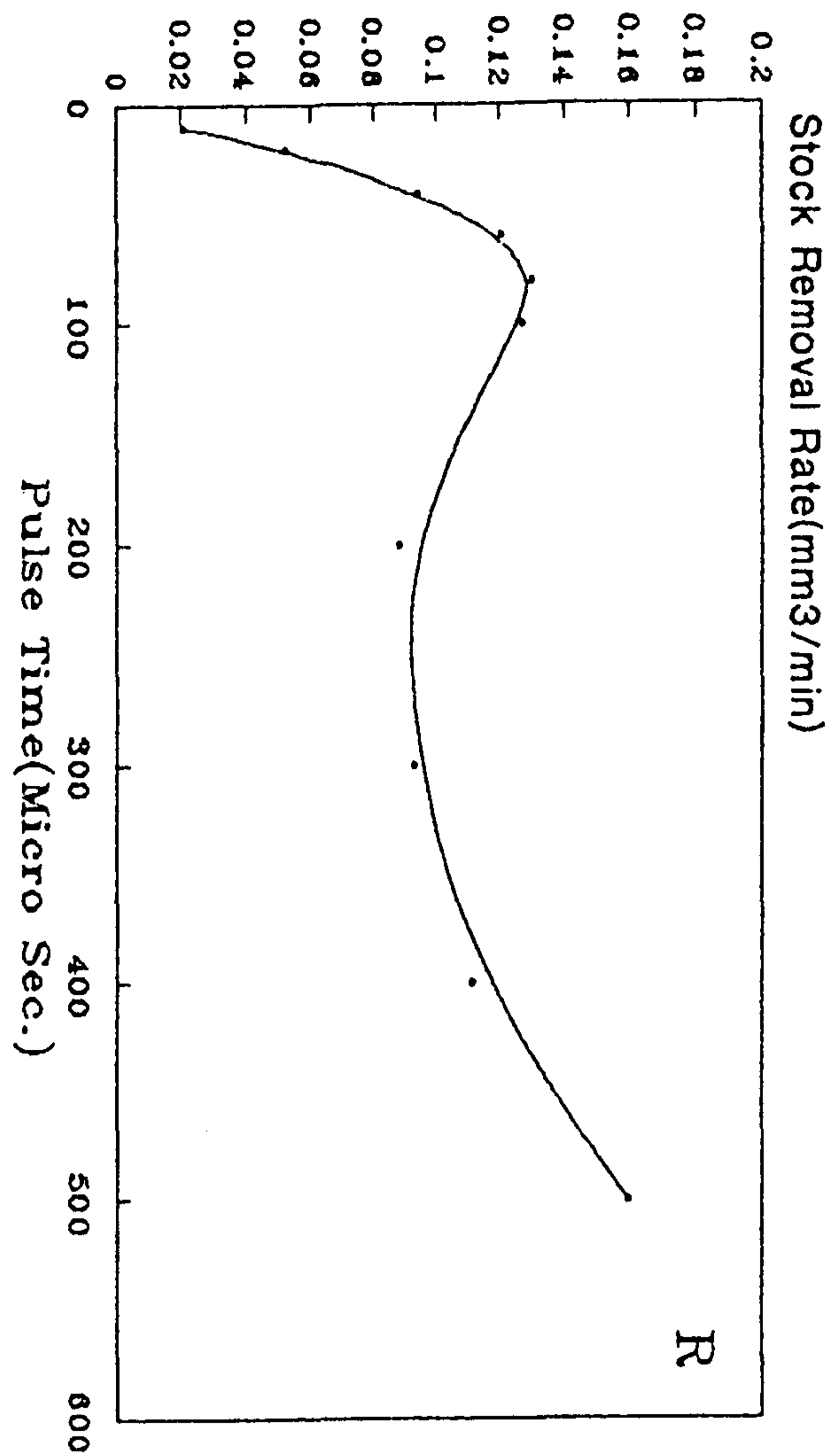
$$\text{درصد پالس مدار باز} = \frac{d}{m \times m} \times 100$$

بحث

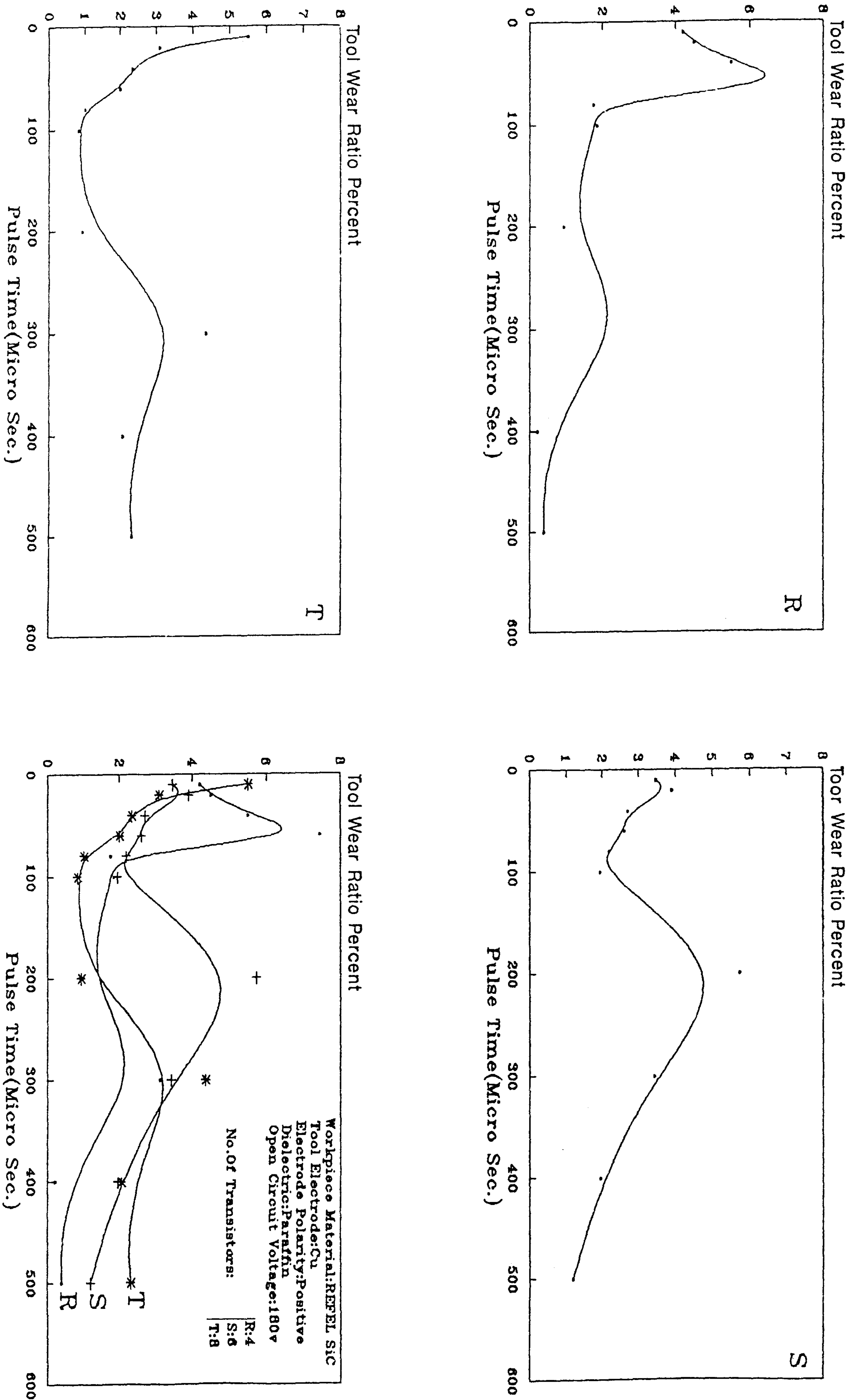
در ابتدای ماشینکاری به خاطر عدم توازی دقیق سطح‌های ابزار و قطعه کار، تمرکز جرقه‌ها در نواحی نزدیکتر دو الکتروود بیشتر و به علت تجمع آلودگیها در این نواحی، ناپایداری در بدو ماشینکاری زیاد خواهد بود (شکل ۴). این مسئله در ماشینکاری با جریان بالاتر واضح‌تر مشاهده می‌شود. بنابراین لازم است در چند دقیقه اول، ماشینکاری را با جریان کمتر شروع کرد. در ادامه ماشینکاری که



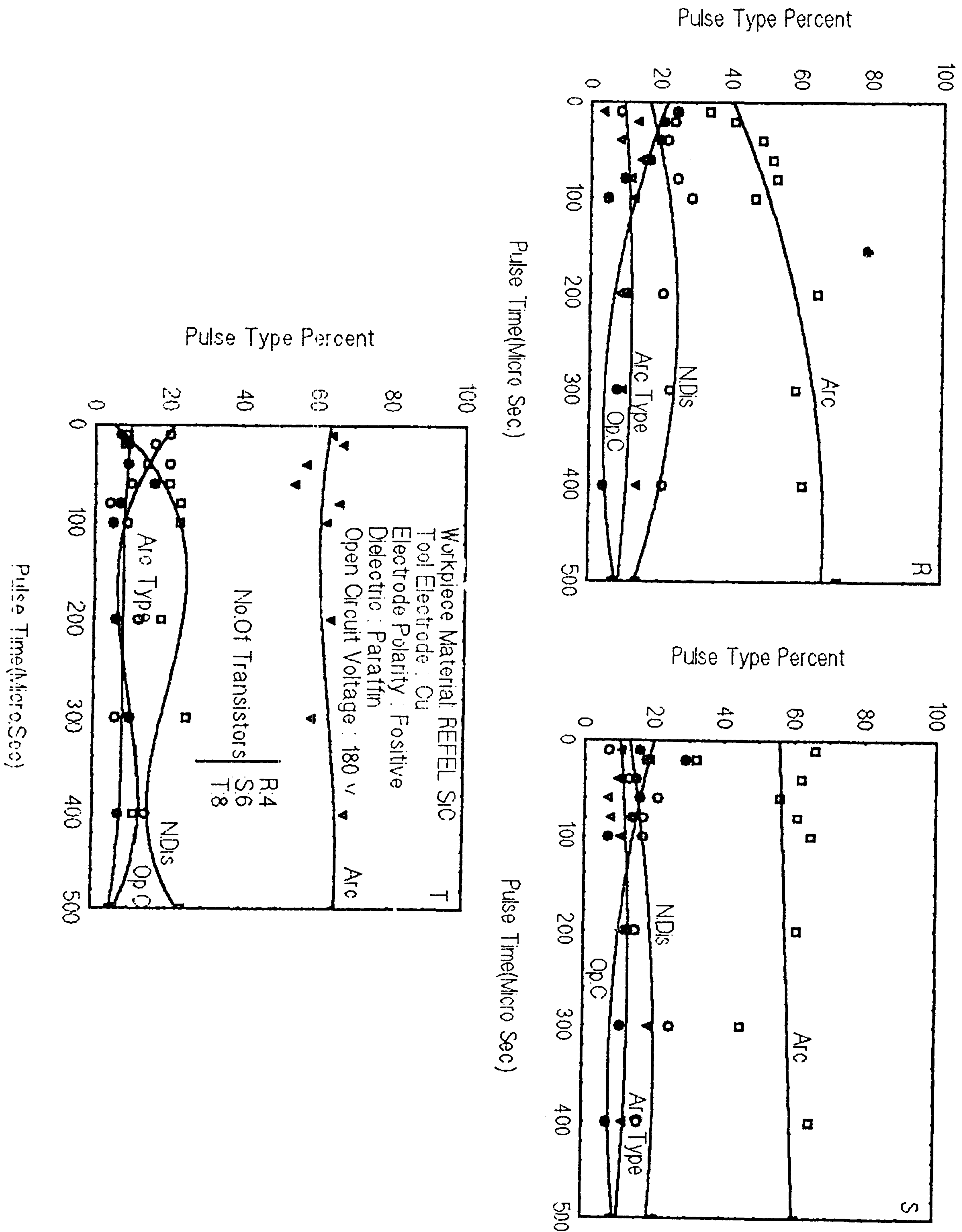
شکل ۶: منحنی تغییرات شدت جریان متوسط برحسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری سیلیکون کارباید با سه جریان مختلف.



شکل ۷: منحنی تغییرات سرعت براده برداری برحسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری سیلیکون کار باید با سه جریان مختلف.



شکل ۸: منحنی تغییرات فرسایش نسبی ابزار برحسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری سیلیکون کارباید با سه جریان مختلف.



شکل ۹: منحنی تغییرات درصد انواع پالسها برحسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری سیلیکون کارباید با سه جریان مختلف.

نتیجه گیری

عملیات ماشینکاری سیلیکون کارباید به روش EDM برای سه قطعه کار یکسان و شرایط مختلف ماشینکاری و با استفاده از ابزار مفتول مسی و عایق نفت سفید با ولتاژ مدار باز اسمی ۱۸۰ ولت به منظور بررسی علل ناپایداری در ماشینکاری این ماده انجام گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- افزایش زمان روشنی پالس و تعداد ترانزیستور در مدار باعث افزایش ناپایداری فرآیند میشود.

- افزایش تعداد ترانزیستور در مدار تأثیر مهمی در سرعت باربرداری و فرسایش نسبی ابزار ندارد.

- جرقه‌های آرک با حدود ۶۰٪ بالاترین و پالسهای مدار باز کمتر از ۲۰٪ کمترین درصد پالسها را در شرایط مختلف زمان روشنی پالس و تغییر تعداد ترانزیستورها در مدار شامل می‌شود. درصد جرقه‌های عادی کم و نزدیک به درصد پالسهای مدار باز است.

- در اثر افزایش تعداد ترانزیستور در مدار زبری سطحی تغییرات مهمی ندارد. درحالی‌که در مورد فولاد تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشهود است. این موضوع منطبق بر رفتار منحنیهای سرعت باربرداری، فرسایش نسبی ابزار و درصد هر یک از پالسهای چهارگانه و نیز منطبق بر نتایج تئوری توزیع درجه حرارت در سطح قطعه است. افزایش زمان روشنی پالس تأثیر کمی بر زبری سطحی دارد.

- در عکسهای میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از توزیع سیلیکون بر سطح ماشینکاری شده وجود سیلیکون اضافی مقاوم در مقابل جریان الکتریکی مشهود است که می‌تواند یکی از عوامل ناپایداری فرآیند باشد.

- بخاطر حرارت تولیدی زیاد در بدنه کارباید سیلیسیم و زیاد بودن وسعت ناحیه داغ در سطح آن احتمال پیدایش لایه بخار دی‌الکتریک در سطح و تشکیل کانال پلاسمای گشاد که دارای رشد سریع می‌باشد وجود دارد. این موضوع به ویژه در زمانهای طولانی جرقه شدیدتر است که می‌تواند یکی از علل افزایش ناپایداری در زمانهای طولانی جرقه باشد.

تشکر و قدردانی

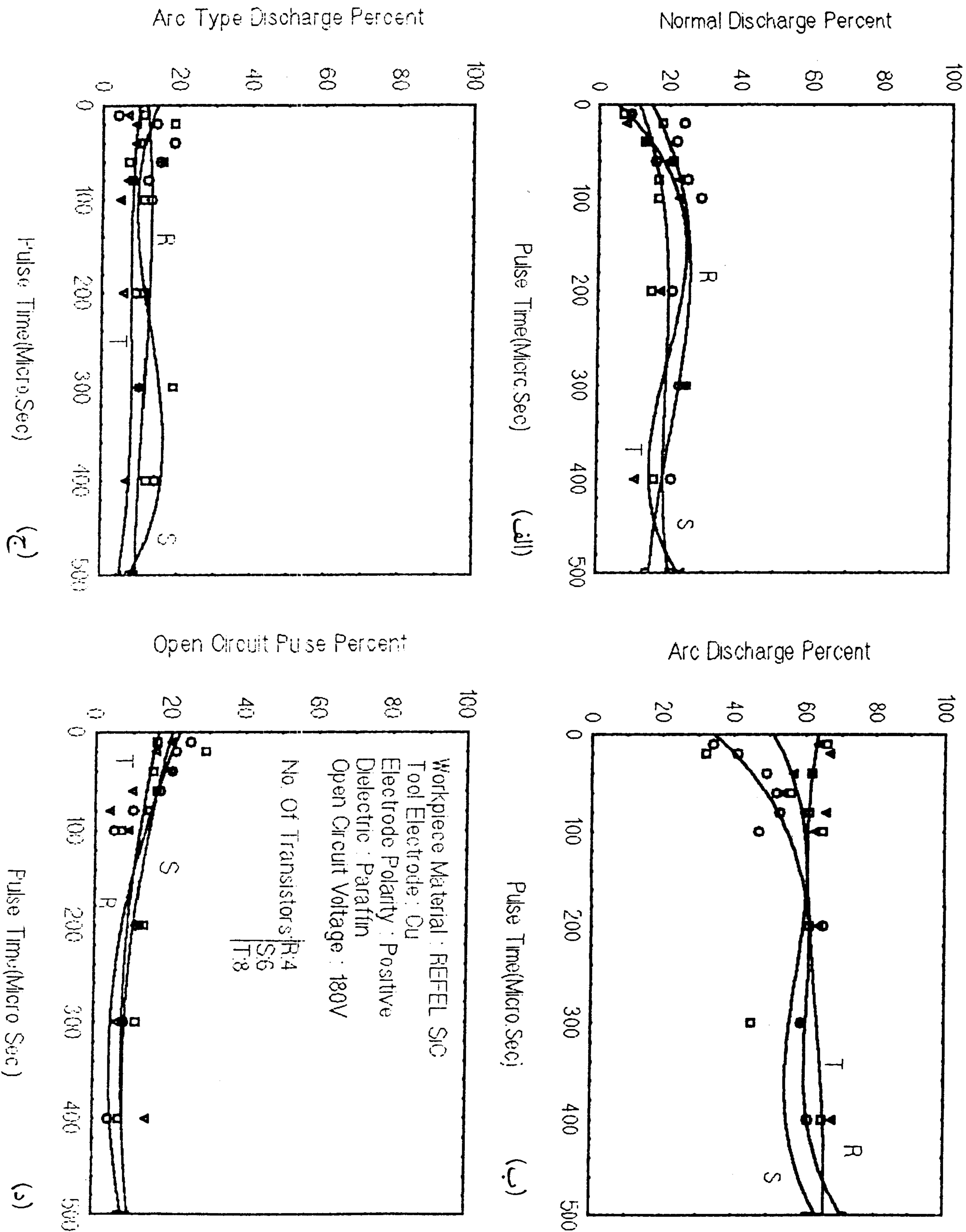
بدینوسیله از آزمایشگاه اندازه‌گیری دقیق، آزمایشگاه تولید مخصوص، کارگاه بخش مکانیک و نیز آزمایشگاه متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر که امکانات لازم را در اختیار این تحقیق قرار داده‌اند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

که درصد هریک از انواع پالسها متأثر از تعداد ترانزیستور در مدار نمی‌باشد.

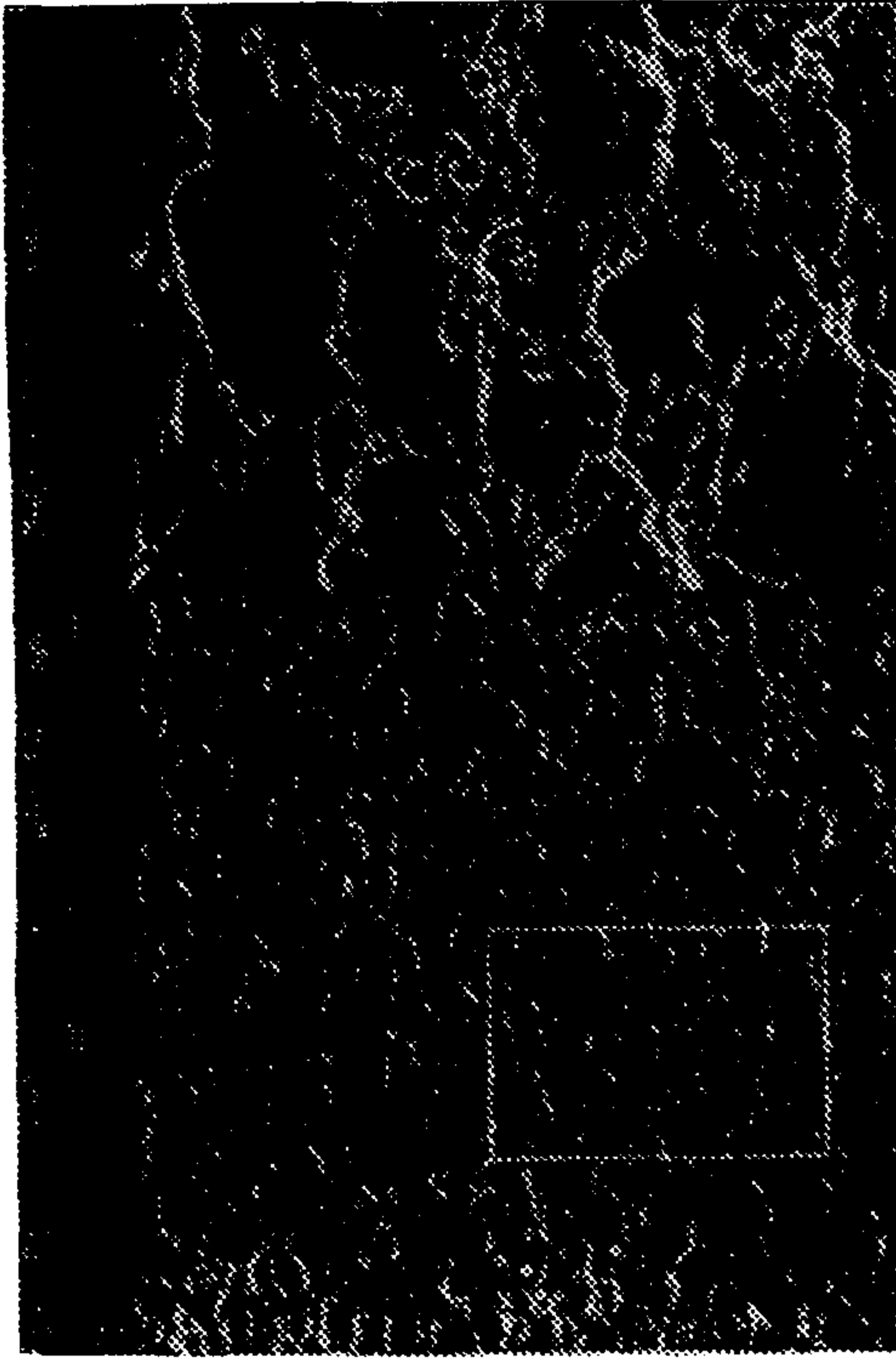
عکسهای میکروسکوپ الکترونی شکل ۱۱ (T_5, S_5, R_5) نشان میدهند که در اثر افزایش تعداد ترانزیستورهای فعال در مدار تفاوت چندانی در بافت سطحی ناحیه ماشینکاری شده مشاهده نمیشود. درحالی‌که عکسهای میکروسکوپ الکترونی شکل ۱۲ (a, b, c) مربوط به ماشینکاری فولاد، تغییر قابل توجه بافت سطحی ناحیه ماشینکاری شده را در اثر افزایش تعداد ترانزیستور در مدار (با شرایط ماشینکاری مشابه کارباید سیلیسیم) نشان میدهند. موضوع یکسان بودن بافت سطحی کارباید سیلیسیم در ماشینکاری با تعداد ترانزیستورهای مختلف با یکسان بودن منحنیهای سرعت باربرداری، فرسایش نسبی ابزار و منحنیهای درصد هریک از پالسهای چهارگانه انطباق دارد. منحنیهای توزیع درجه حرارت در سطح کارباید سیلیسیم و فولاد، در شدت جریانهای مختلف که از آنالیز تئوری بدست آمده‌اند [۸] نیز با عکسهای مذکور مطابقت دارند و نشانگر آنند که در مورد کارباید سیلیسیم تفاوت چندانی بین منحنیهای درجه حرارت در شدت جریانهای مختلف وجود ندارد.

شکل (۱۳) (S_5-Si, S_5) و (T_6-Si, T_6) سطوح ماشینکاری شده را به ترتیب در ($I=6\text{Trans.}, T_i=80\mu s$) و ($I=8\text{Trans.}, T_i=100\mu s$) در حالت عادی و بعد از اخذ توزیع سیلیکون نشان میدهند. توزیع سیلیکون در سطح ماشینکاری شده گویای آن است که پدیده تجزیه ماده و نشست و انجماد سیلیکون خالص در بعضی از مناطق صورت گرفته است. وجود سیلیکون خالص که در مقابل عبور جریان مقاومت بالایی دارد ($\rho_{Si} = 2/3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ در 20°C) [۱] و ($\rho_{SiC} = 0/42 \Omega \cdot \text{cm}$) می‌تواند یکی از عوامل ناپایداری فرآیند باشد.

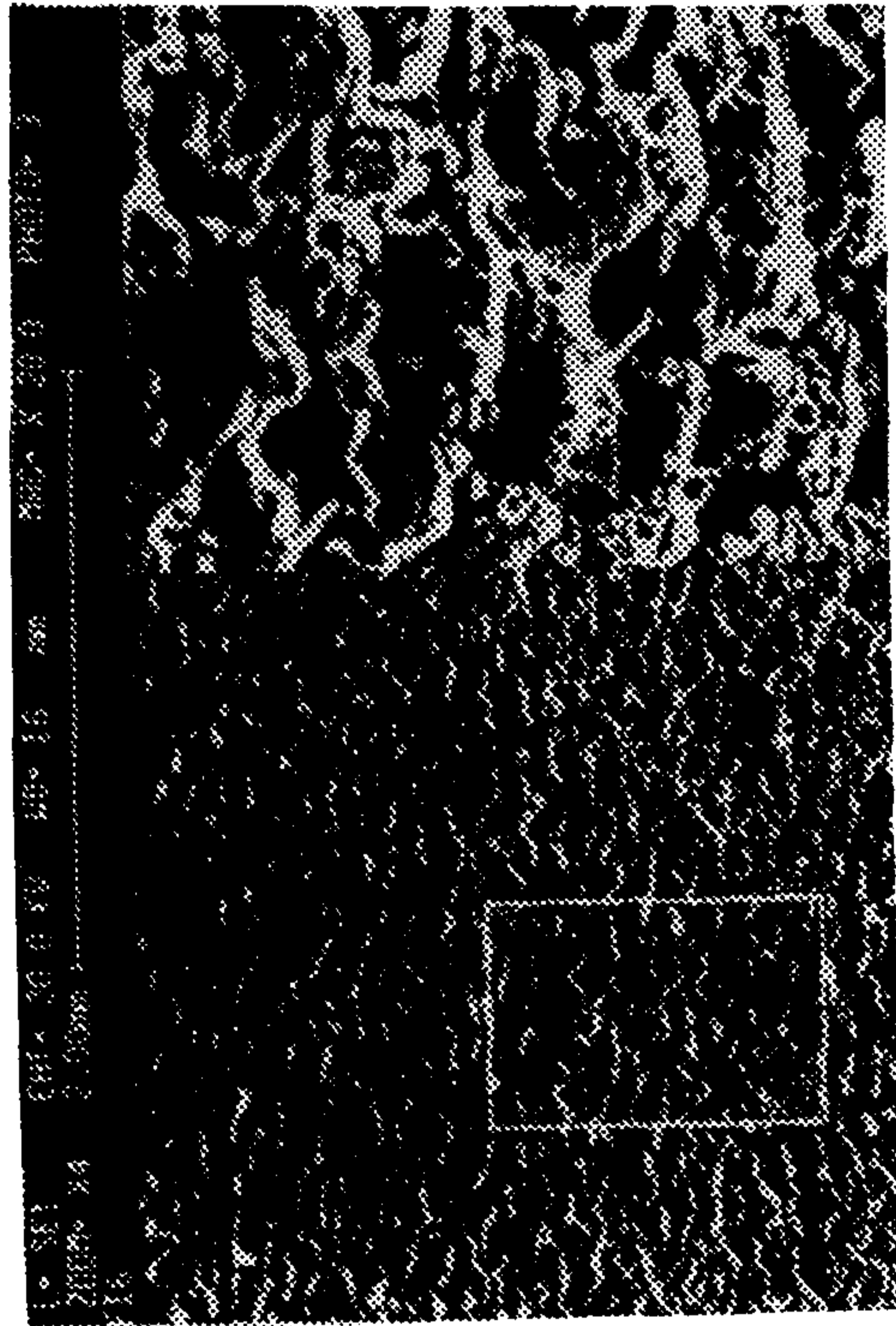
بررسی تئوریک انتقال حرارت فرآیند ماشینکاری کارباید سیلیسیم توسط EDM نشان میدهد که حرارت تولیدی ژول در قطعه کارباید سیلیسیم حدوداً ۱/۷ برابر انرژی وارد به آن از پلاسماست [۸] و علیرغم کمتر بودن انرژی پلاسمای آن در مقایسه با فولاد، درجه حرارت سطح این ماده به مراتب بالاتر از دمای سطح قطعه کار فولادی است و وسعت ناحیه داغ در سطح آن بیشتر از وسعت ناحیه داغ در سطح فولاد است. لذا احتمال پیدایش لایه بخار دی‌الکتریک در سطح که باعث تشکیل کانال پلاسمای گشاد و دارای رشد سریع می‌شود و در نتیجه جرقه‌های آرکی به وقوع می‌پیوندد. این موضوع در زمانهای طولانی جرقه شدیدتر است که می‌تواند یکی از علل ناپایداری در زمانهای طولانی جرقه باشد.



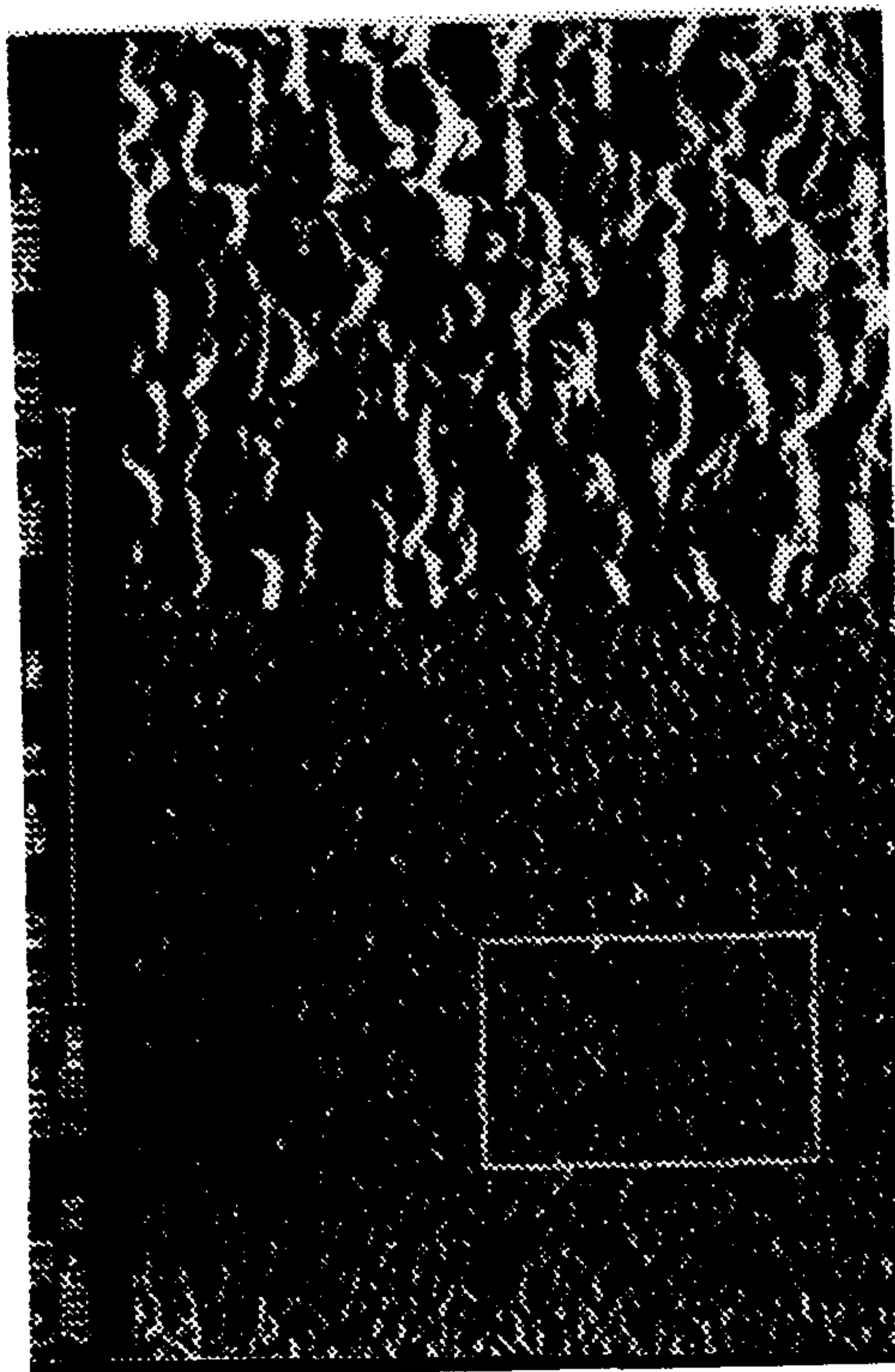
شکل ۱۰: منحنی تغییرات درصد پالسهای چهارگانه به تفکیک برحسب زمان روشنی پالس در ماشینکاری سیلیکون کارباید با سه جریان مختلف.



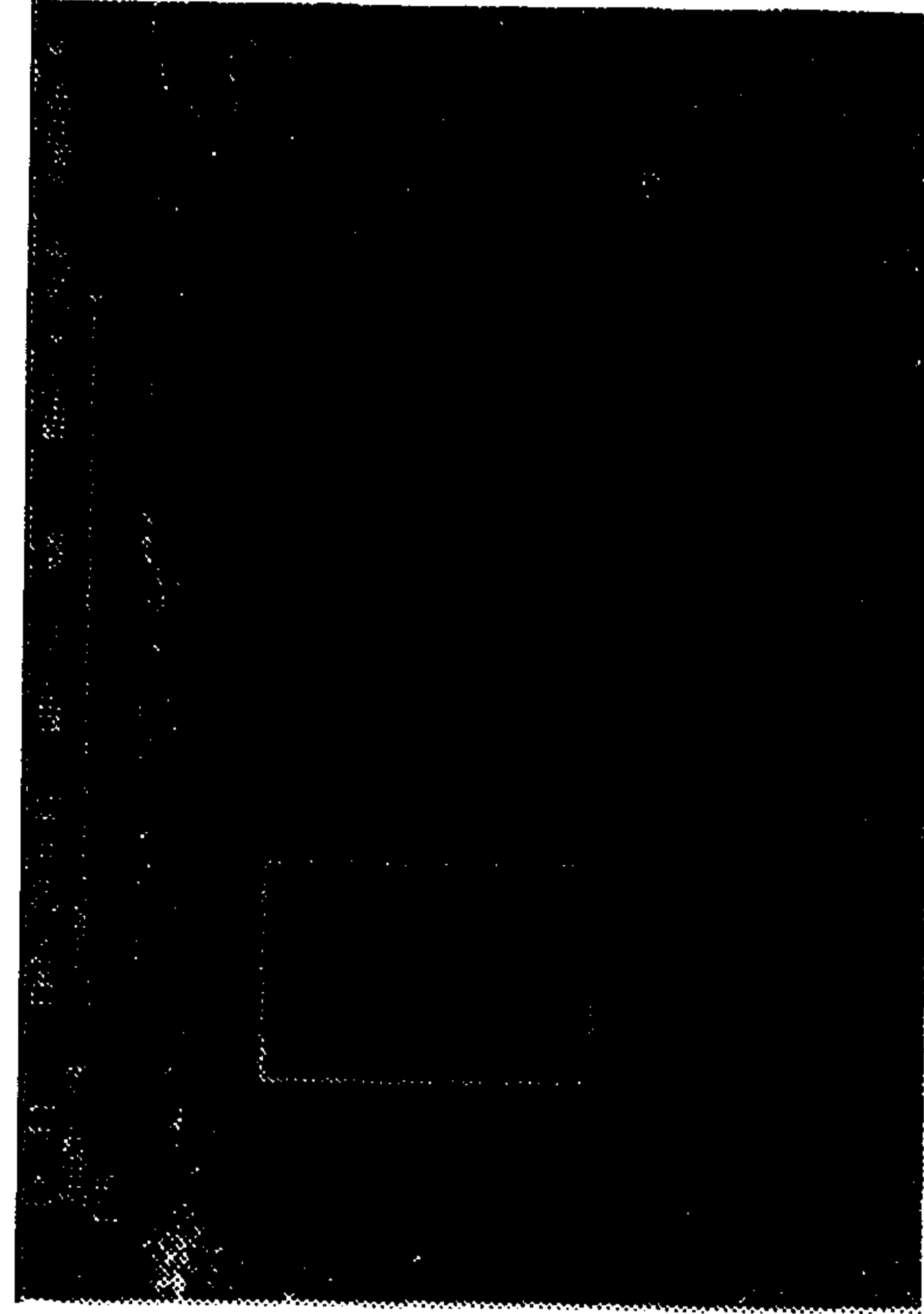
(c) جنس: فولاد ولتاژ مدار باز: ۱۲.۷ زاویه دید: ۶۰
تعداد ترازیستور در مدار: ۸ (T_i = T_o = ۸۰.۴S)



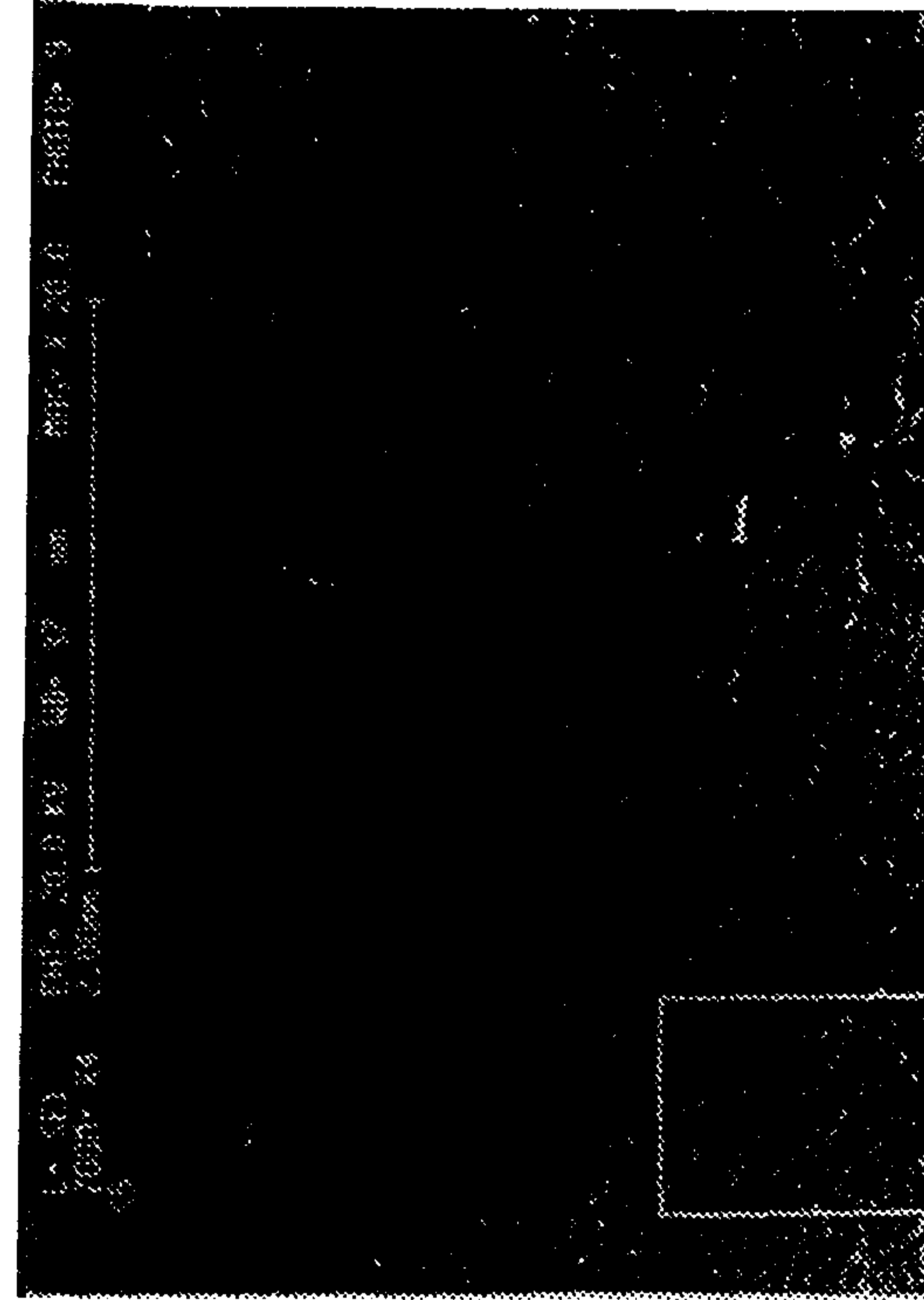
(b) جنس: فولاد ولتاژ مدار باز: ۱۲.۷ زاویه دید: ۶۰
تعداد ترازیستور در مدار: ۶ (T_i = T_o = ۸۰.۴S)



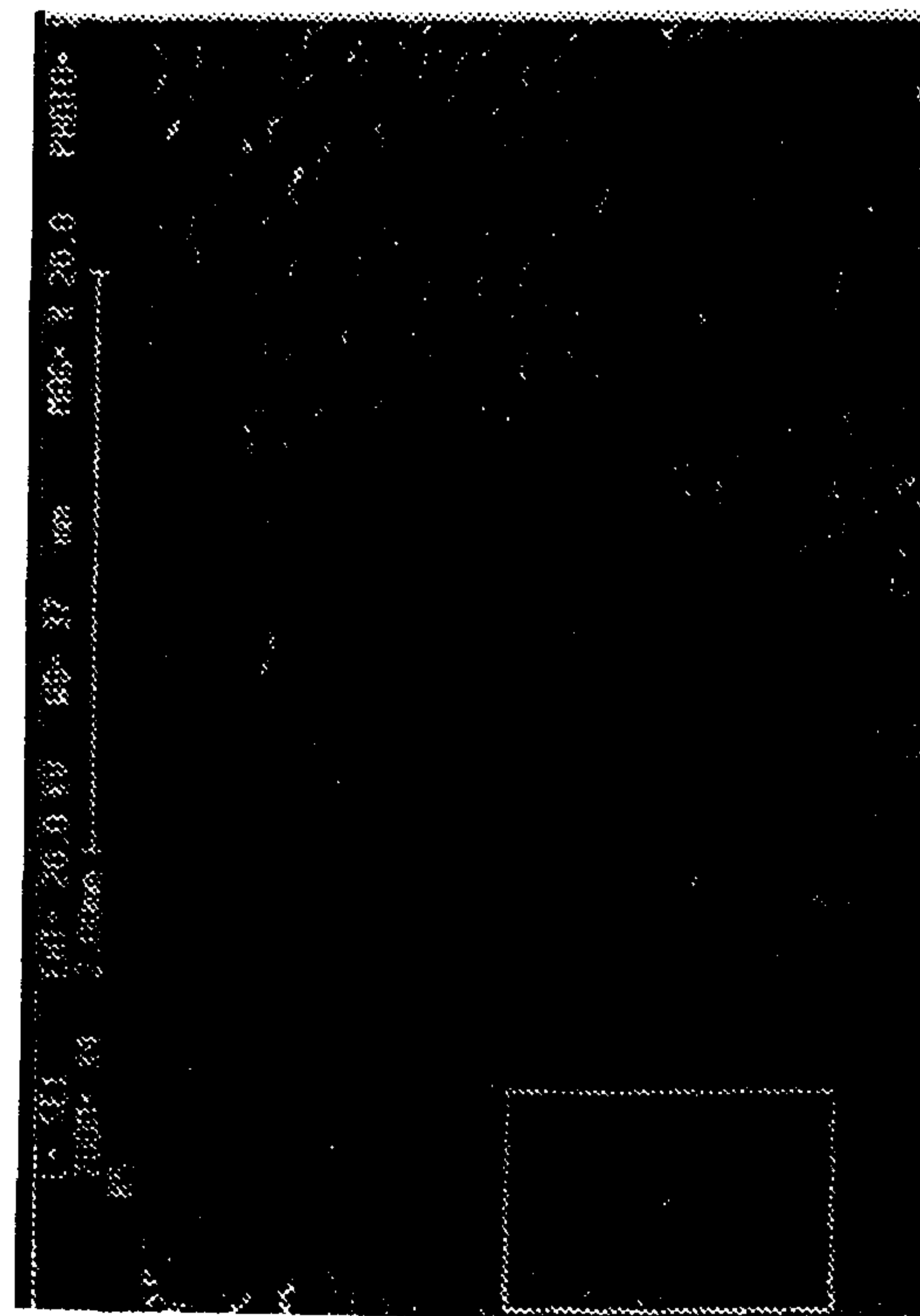
(a) جنس: فولاد ولتاژ مدار باز: ۱۲.۷ زاویه دید: ۶۰
تعداد ترازیستور در مدار: ۴ (T_i = T_o = ۸۰.۴S)



(T5) جنس: SiC ولتاژ مدار باز: ۱۸.۷ زاویه دید: ۶۰
تعداد ترازیستور در مدار: ۸ (T_i = T_o = ۸۰.۴S)



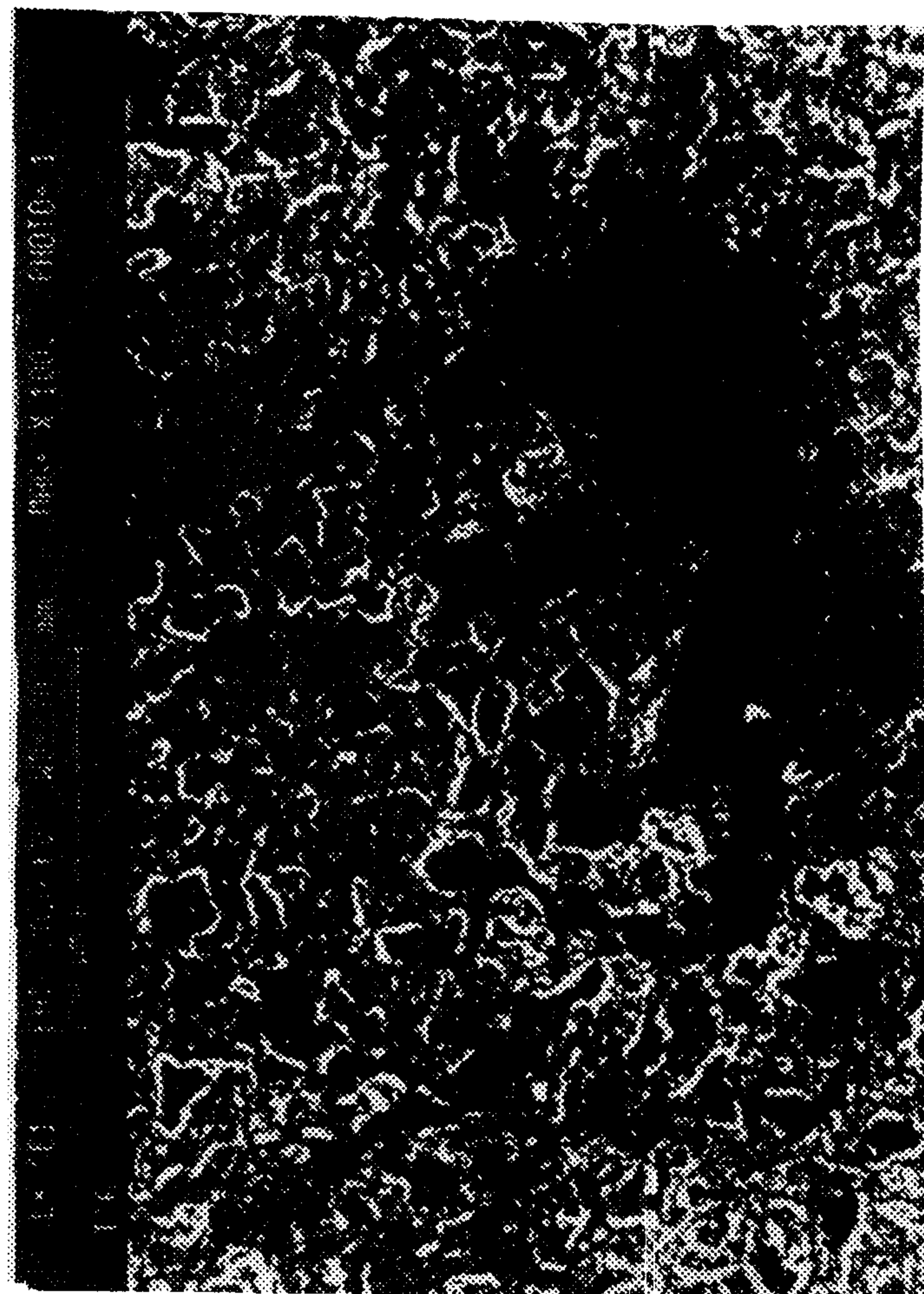
(S5) جنس: SiC ولتاژ مدار باز: ۱۸.۷ زاویه دید: ۶۰
تعداد ترازیستور در مدار: ۶ (T_i = T_o = ۸۰.۴S)



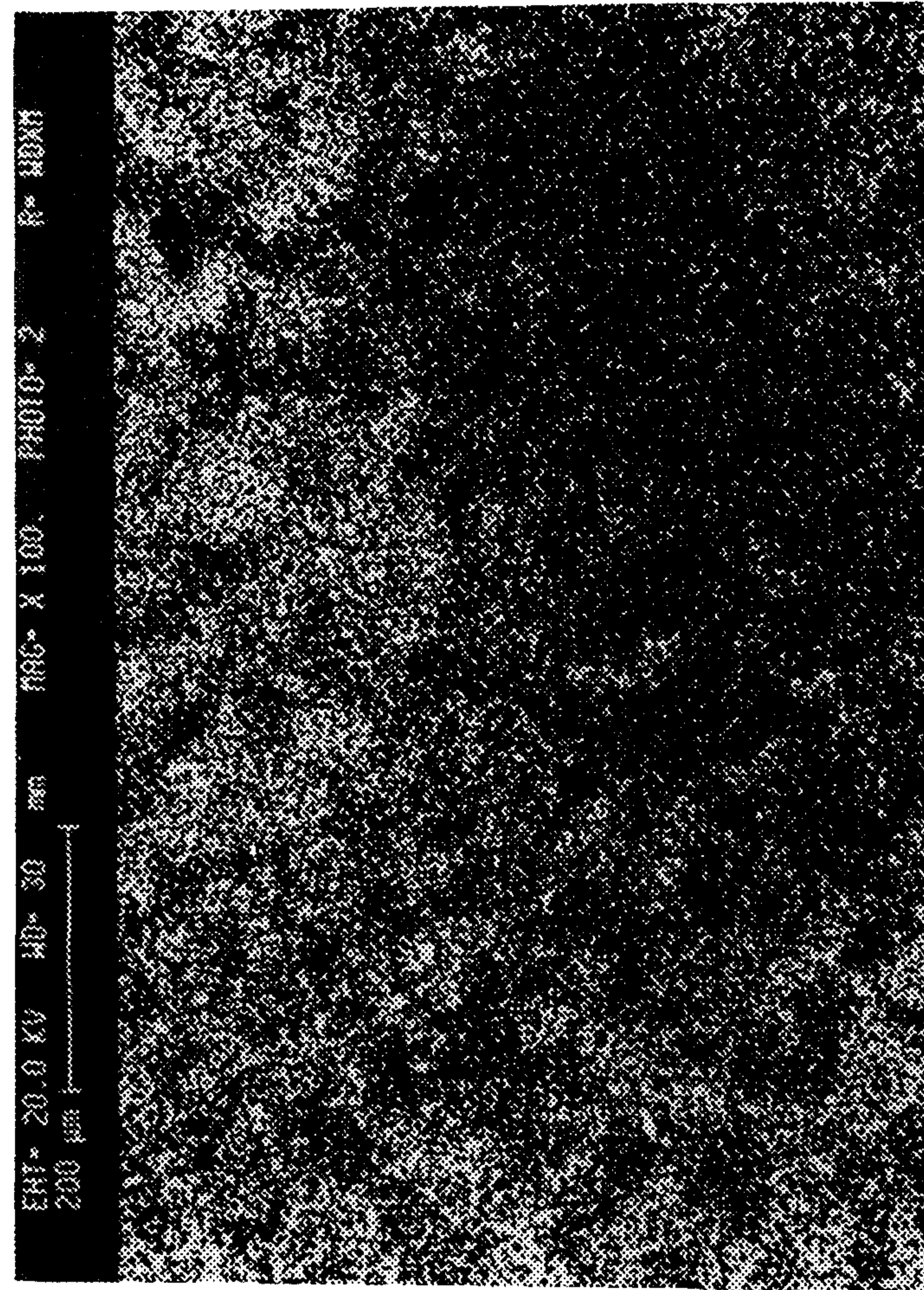
(R5) جنس: SiC ولتاژ مدار باز: ۱۸.۷ زاویه دید: ۶۰
تعداد ترازیستور در مدار: ۴ (T_i = T_o = ۸۰.۴S)

شکل ۱۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده فولاد در سه شدت جریان مختلف.

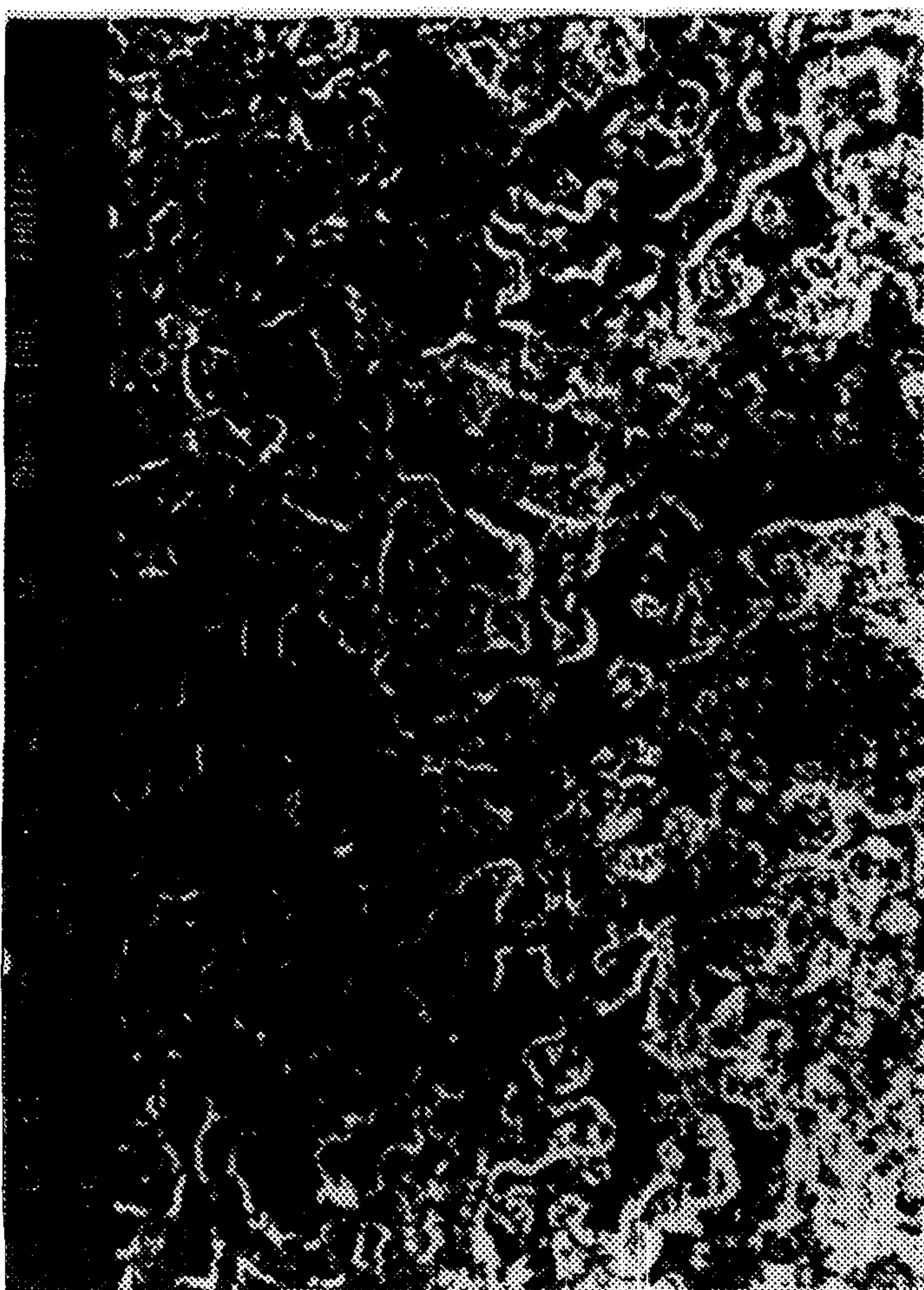
شکل ۱۱: تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده سیلیکون کارباید در سه شدت جریان مختلف.



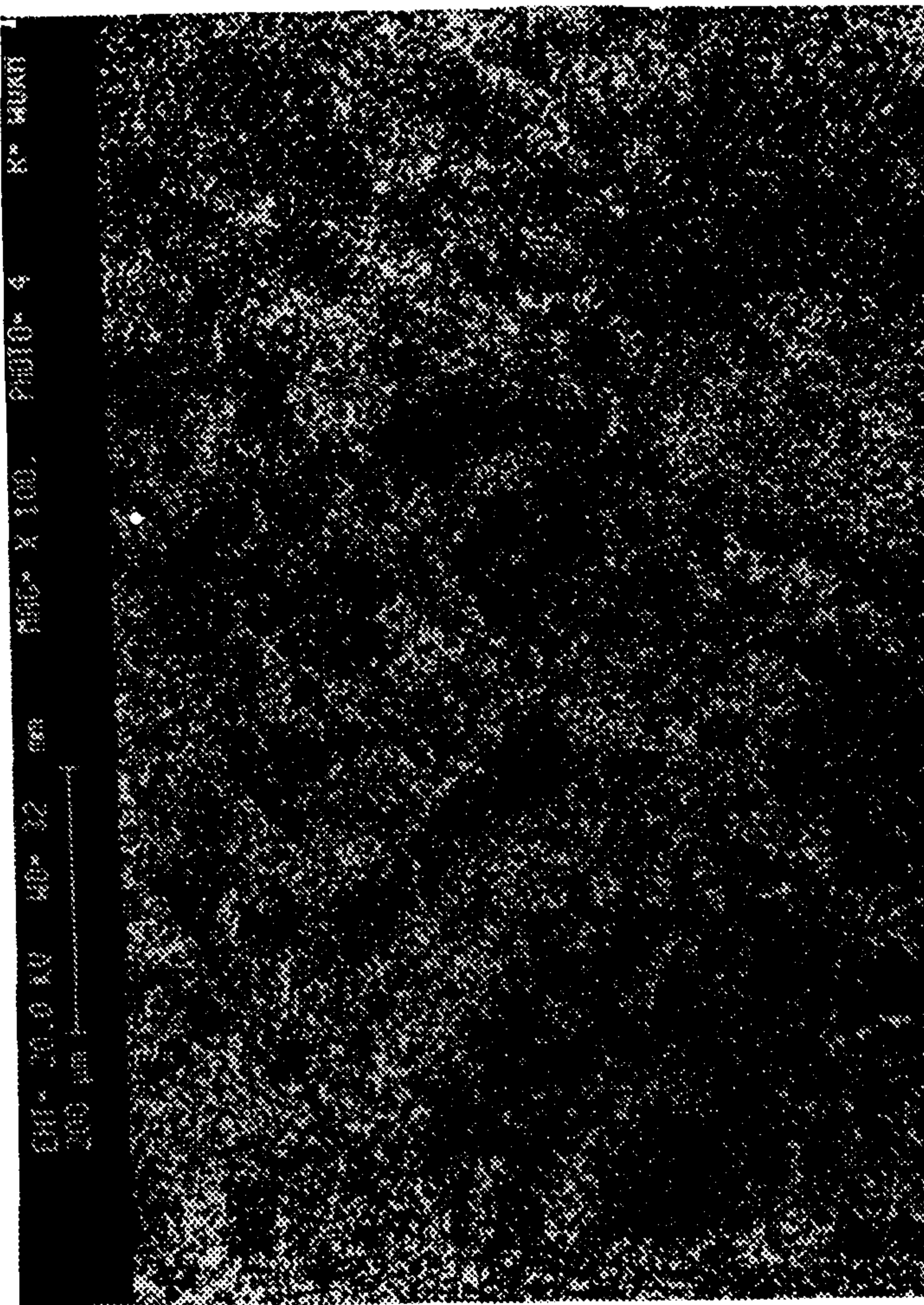
جنس: T6) و لتاز مدار بار: ۱۸۰۷ زاویه دید: صفر
تعداد ترازیستور در مدار: ۸ (S) $T_i = T_o = 100$



جنس: T6-Si) و لتاز مدار بار: ۱۸۰۷ زاویه دید: صفر
تعداد ترازیستور در مدار: ۸ (S) $T_i = T_o = 100$



جنس: S5) و لتاز مدار بار: ۱۸۰۷ زاویه دید: صفر
تعداد ترازیستور در مدار: ۶ (S) $T_i = T_o = 80$



جنس: S5-Si) و لتاز مدار بار: ۱۸۰۷ زاویه دید: صفر
تعداد ترازیستور در مدار: ۶ (S) $T_i = T_o = 80$

شکل ۱۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطوح ماشینکاری شده سیلیکون کارباید در حالت عادی و پس از اخذ توزیع سیلیکون.

مراجع

- 1 - Brook, R. J. (1991). "Concise encyclopedia of advanced ceramic materials." *Max-Planck-Institut für Metall for Schung Stuttgart, Germany.*
- 2 - Kennedy, P. and Shennax, J. V. (1973). "Engineering applications of REFEL Silicon - Carbide." *Proceedings of 3rd Conference on Silicon - Carbide, Miami, USA.*
- 3 - Forrest, C. W., Kennedy, P. and Shennan, J. V. (1972). "The fabrication and properties of self-bonded Silicon Carbide bodies." *Special Ceramics, British Ceramic Research Association.*
- 4 - Reid, D. S. and Shaw, J. W. (1969). "The machining of Silicon-Carbide." *Reactor Fuel Element Laboratories, UKAEA, Spring Fields, Preston.*
- 5 - Humphrey, P. D. (1979). "An investigation into the electrical discharge machining of Silicon Carbide." *Reactor Fuel Element Laboratories, UKAEA, Spring, Fields preston.*
- 6 - Van Dijck, F. (1973). "Physico - mathematical analysis of the electro-discharge machining process." *Ph.D. Thesis, Catholic University of Leuven, (English translation).*
- 7 - EDM Product Group (1986). "Spark erosion machines operating instructions." *DE Center, Germany.*
- ۸ - مهدوی نژاد، رع. و عبدالله، ا. "بررسی انتقال حرارت فرآیند ماشینکاری سیلیکون کارباید به روش EDM."
- 9 - Green, L. F. (1978). "High voltage pulsed EDM with special reference to Silicon Carbide." *M.Sc. Dissertation, UMIST.*
- 10 - Ajmal, A. (1981). "The electrical discharge machining of Silicon Carbide." *M.Sc. Dissertation, UMIST.*

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Electro Discharge Machining (EDM)
- 2 - Acheson
- 3 - REFEL Silicon or Siliconized Silicon Carbide or Reaction bonded Silicon Carbide
- 4 - United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA)
- 5 - British Nuclear Fuel Laboratories (BNFL)
- 6 - Electro - Chemical Machining
- 7 - Electron Beam Machining