

# Laser-Assisted Patterning of 2D/1D WS<sub>2</sub>/CNT Electrodes for All-Solid-State In-Plane Microsupercapacitors with Improved Rate Performance

## Abstract

Microsupercapacitors (MSCs) based on high-performance electrode nanomaterials are considered alternative power sources capable of meeting the growing needs of miniaturized electronic devices. Tungsten disulfide (WS<sub>2</sub>) nanosheets, with their large surface area and pseudocapacitive nature, serve as potential building blocks for MSC device fabrication. However, the poor electrical conductivity of semiconducting 2H WS<sub>2</sub> nanosheets hinders electron transport, thereby limiting the specific capacitance and rate performance of the resulting MSCs. In this study, we report the fabrication of laser-scribed all-solid-state high-rate MSCs by incorporating carbon nanotubes (CNTs) into liquid-exfoliated WS<sub>2</sub> nanosheets. The optimized MSC device (WS<sub>2</sub>/CNT5) exhibits an areal capacitance of 6.8 mF cm<sup>-2</sup> at 100 μA cm<sup>-2</sup>, with excellent cyclic stability of 88.9% after 1000 cycles. Notably, the CNT-incorporated devices, WS<sub>2</sub>/CNT5 and WS<sub>2</sub>/CNT10, demonstrate substantial enhancements in rate capability, with 74% and 91% retention, respectively, compared to the pristine WS<sub>2</sub>-based device. Additionally, WS<sub>2</sub>/CNT5 MSC demonstrates excellent energy and power densities of 0.94 μW h cm<sup>-2</sup> and 0.05 mW cm<sup>-2</sup>. These results can be attributed to the formation of a conductive 1D CNT network within the 2D WS<sub>2</sub> structure, which facilitates fast electron transport. We believe this strategy can be extended to other synergistic 2D/1D nanocomposites for scalable and facile fabrication of high-rate MSC devices.

حکاکی الکترودهای دو بعدی/یک بعدی دی سولفید تنگستن / نانولوله کربنی (WS<sub>2</sub>/CNT) با کمک لیزر برای ساخت میکروابرخازن های تمام حالت جامدی درون صفحه ای با عملکرد نرخ بهبود یافته

## چکیده

میکروابرخازن ها مبتنی بر الکترودهای با عملکرد بالا ساخته شده از نانومواد به عنوان منابع ذخیره انرژی جایگزین در نظر گرفته می شوند که قادر به برآورده کردن نیازهای رو به رشد دستگاه های الکترونیکی مینیاتوری هستند. نانورقه های دی سولفید تنگستن (WS<sub>2</sub>)، با سطح بزرگ و ماهیت شبه خازنی خود، به عنوان یک ماده بالقوه برای ساخت دستگاه میکروابرخازن ها عمل می کنند. با این حال، هدایت

الکتريکی ضعيف نانورقه های نیمه‌هادی فاز 2H از WS<sub>2</sub> انتقال الکترون را مختل می‌کند و در نتیجه ظرفیت ویژه و عملکرد نرخ میکروبرخازن های حاصل را محدود می‌کند. در این مطالعه، ما ساخت میکروبرخازن های با نرخ بالا تمام حالت جامدی حکاکي شده با لیزر را با ترکیب نانولوله‌های کربنی (CNT) در نانورقه های WS<sub>2</sub> لایه برداری شده در محیط مایع را گزارش می‌دهیم. دستگاه میکروبرخازن بهینه‌شده (WS<sub>2</sub>/CNT5) ظرفیت سطحی ۶۸ میلی‌فاراد بر سانتی‌متر مربع را در ۱۰۰ میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع و با پایداری چرخه‌ای عالی ۸۸.۹٪ پس از ۱۰۰۰ چرخه متوالی را نشان می‌دهد. به طور قابل توجه، دستگاه‌های حاوی CNT، یعنی WS<sub>2</sub>/CNT5 و WS<sub>2</sub>/CNT10، به ترتیب با حفظ ۷۴٪ و ۹۱٪ در مقایسه با دستگاه مبتنی بر WS<sub>2</sub> بهبودهای قابل توجهی در قابلیت نرخ نشان می‌دهند. علاوه بر این، میکروبرخازن WS<sub>2</sub>/CNT5 چگالی انرژی و توان عالی به ترتیب ۰.۹۴ میکرووات ساعت بر سانتی‌متر مربع و ۰.۰۵ میلی‌وات بر سانتی‌متر مربع را نشان می‌دهد. این نتایج را می‌توان به تشکیل یک شبکه هدایتی یک‌بعدی CNT در ساختار دوبعدی WS<sub>2</sub> نسبت داد که انتقال سریع الکترون را تسهیل می‌کند. ما معتقدیم که این استراتژی می‌تواند برای ساخت مقیاس‌پذیر و ساده دستگاه‌های میکروبرخازن ها با نرخ بالا به سایر نانو کامپوزیت‌های دوبعدی/یک‌بعدی گسترش یابد.